

УДК 541.49:539.26

РЕАКЦИИ ТРЕУГОЛЬНЫХ КЛАСТЕРОВ МОЛИБДЕНА И ВОЛЬФРАМА С ТЕТРАБРОМОПИРОКАТЕХИНОМ¹

© 2023 г. П. А. Петров^{1, *}, Е. А. Филиппова¹, В. Р. Гиниятуллин², Т. С. Сухих¹, Д. Г. Шевень¹, А. Л. Гущин¹, М. Н. Соколов¹

¹Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

*e-mail: panah@niic.nsc.ru

Поступила в редакцию 27.10.2022 г.

После доработки 27.01.2023 г.

Принята к публикации 10.03.2023 г.

Реакция кластерного комплекса (ⁿBu₄N)₂[Mo₃Se₇Br₆] с тетрабромопирокатехином (H₂Tbc) в присутствии Et₃N и Ph₄PBr приводит к образованию (Ph₄P)₂[Mo₃Se₇(Tbc)₃] · 2MeOH (Ia · 2MeOH). Его вольфрамовый аналог (ⁿBu₄N)₂[W₃S₇Br₆] в тех же условиях полностью или частично разрушается с образованием комплекса (Ph₄P)(Et₃NH)[WO₂(Tbc)₂] (II). Структуры Ia · 2MeOH и II установлены методом рентгеноструктурного анализа (CCDC № 2213900 и 2213901 соответственно). Окислительно-восстановительные свойства комплекса Ia, а также его аналогов (Ph₄P)₂[Mo₃S₇(Tbc)₃] (Ib) и (Ph₄P)₂[Mo₃S₇(Tcc)₃] (Ic) (Tcc = тетрахлоорокатехолат) были изучены методом циклической вольтамперометрии.

Ключевые слова: молибден, вольфрам, кластеры, редокс-активные лиганды, циклическая вольтамперометрия

DOI: 10.31857/S0132344X22600485, **EDN:** SAABSD

В последние десятилетия наблюдается устойчивый интерес к комплексам как переходных, так и непереоходных элементов с редокс-активными лигандами, способными находиться в нескольких степенях окисления. Эти комплексы рассматриваются как предшественники материалов с интересными магнитными, электрофизическими, оптическими и каталитическими свойствами [1]. Например, семейство кластерных комплексов молибдена с дитиолоновыми лигандами оказалось предшественником монокомпонентных молекулярных проводников [2–5]. Диоксоленовые аналоги данных кластеров существенно более малочисленны — известны лишь производные тетрагалопирокатехинов [6, 7]. Попытка получения сульфидного кластера молибдена с 3,6-ди-*трет*-бутилкатехолатом ((Cat³⁶)²⁻) привела к полному разрушению кластерного остова и выделению моноядерного комплекса пятивалентного молибдена [Mo(Cat³⁶)₃]⁻ [8]. Взаимодействие Na₂Cat³⁶ и [Mo₂(OAc)₄] также приводит к расщеплению связи металл–металл и образованию [Mo(Cat³⁶)₃]⁻ [9]. С другой стороны, известно, что тиомолибденовые кластеры

(например, производные {Mo₃S₇}⁴⁺) гораздо многочисленнее их аналогов, содержащих W и/или более тяжелые халькогены, и зачастую для получения последних требуется разработка специальных методов синтеза [10–13]. В то время как известен лишь один пример дитиолонового комплекса с ядром {Mo₃Se₇}⁴⁺ [4], дитиолоновые кластеры вольфрама вообще неизвестны. Настоящая работа посвящена исследованию реакций (ⁿBu₄N)₂[Mo₃Se₇Br₆] и (ⁿBu₄N)₂[W₃S₇Br₆] с тетрабромопирокатехином.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исходные кластеры синтезировали по литературным методикам [14]. Et₃N перегоняли над таблетками КОН. ИК-спектры записывали в таблетках KBr на приборе SCIMITAR FTS 2000. Элементный анализ выполняли на CHNS-анализаторе Euro EA 3000 в аналитической лаборатории ИНХ СО РАН. Циклические вольтамперограммы (ЦВА) регистрировали на приборе Computrace 797 VA (Metrohm, Швейцария). Все измерения проводили в трехэлектродной электрохимической ячейке, состоящей из стеклоуглеродного рабочего и платинового вспомогательного электродов и электрода сравнения Ag/AgCl/KCl. В качестве раство-

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0132344X22600485 для авторизованных пользователей.

рителя использовали CH_3CN , который насыщали аргоном перед каждым экспериментом. В качестве фонового электролита использовали гексафторфосфат тетра-*n*-бутиламмония (0.1 М раствор). Концентрация исследуемого соединения составляла ~1 мМ. Скорость развертки потенциала – 100 мВ/с. Значения потенциала полуволны ($E_{1/2}$) определяли как $(E_a + E_c)/2$, где E_a и E_c относятся к потенциалам анодного и катодного пиков соответственно. В качестве внутреннего стандарта использовали ферроцен (потенциал пары $\text{Fc}/\text{Fc}^+ = 0.43$ В).

Синтез комплекса $(\text{Ph}_4\text{P})_2[\text{Mo}_3\text{Se}_7(\text{Tbc})_3]$ (Ia). К желтому раствору, полученному после растворения 163 мг (0.387 ммоль) H_2Tbc и 150 мкл (109 мг, 1.08 ммоль) Et_3N в 20 мл ацетонитрила, добавляли 254 мг (0.12 ммоль) кластера $({}^n\text{Bu}_4\text{N})_2[\text{Mo}_3\text{Se}_7\text{Br}_6]$. Образовавшийся темно-коричневый раствор перемешивали при комнатной температуре 24 ч, затем упаривали на ротационном испарителе. Остаток экстрагировали метанолом (10 мл + 5 мл + 5 мл) при помощи ультразвуковой бани. Экстракты объединяли, фильтровали через стеклянный фильтр (G4) и добавляли 125 мг (0.3 ммоль) Ph_4PBr . Выпавший коричневый осадок промывали метанолом, высушивали и растворяли в смеси CH_2Cl_2 –метанол (1 : 1). Медленное упаривание на воздухе полученного раствора привело к образованию монокристаллов $(\text{Ph}_4\text{P})_2[\text{Mo}_3\text{Se}_7(\text{Tbc})_3] \cdot 2\text{MeOH}$ (Ia · 2MeOH), пригодных для PCA. Выход 116 мг (35%).

ИК-спектр (KBr; ν , cm^{-1}): 3054 ср, 1586 сл, 1483 сл, 1426 с, 1344 сл, 1266 с, 1234 с, 1208 сл, 1108 ср, 1026 сл, 997 сл, 929 ср, 744 ср, 723 ср, 688 ср, 524 с, 415 сл. (–)-ES-MS (m/z): 1055.7 ($[\text{Mo}_3\text{Se}_7(\text{Tbc})_3]^{2-}$, 100%), 2120.0 ($[\text{HMo}_3\text{Se}_7(\text{Tbc})_3]^-$, 10%), 2449.3 ($\{(\text{Ph}_4\text{P})-[\text{Mo}_3\text{Se}_7(\text{Tbc})_3]\}^-$, 20%).

Найдено, %: C 28.45; H 1.65.
Для $\text{C}_{68}\text{H}_{48}\text{O}_8\text{P}_2\text{Se}_7\text{Br}_{12}\text{Mo}_3$
вычислено, %: C 28.59; H 1.69.

Синтез комплекса $(\text{Ph}_4\text{P})(\text{Et}_3\text{NH})[\text{WO}_2(\text{Tbc})_2]$ (II). К желтому раствору, полученному после растворения 162 мг (0.387 ммоль) H_2Tbc и 150 мкл (109 мг, 1.08 ммоль) Et_3N в 20 мл ацетонитрила, добавляли 207 мг (0.119 ммоль) кластера $({}^n\text{Bu}_4\text{N})_2[\text{W}_3\text{S}_7\text{Br}_6]$. Образовавшийся темно-коричневый раствор перемешивали при комнатной температуре 15 ч, затем упаривали на ротационном испарителе. Остаток экстрагировали метанолом (10 мл + 5 мл) при помощи ультразвуковой бани. Экстракты объединяли, фильтровали через стеклянный фильтр (G4) и добавляли 125 мг (0.3 ммоль) Ph_4PBr . Выпавший хлопьевидный осадок отфильтровывали на бумажном фильтре (“синяя лента”). Медленное упаривание зеленовато-коричневого раствора привело к образованию бледно-желтых монокри-

сталлов $(\text{Ph}_4\text{P})(\text{Et}_3\text{NH})[\text{WO}_2(\text{Tbc})_2]$ (II), пригодных для PCA. Выход 54 мг (10%).

ИК-спектр (KBr; ν , cm^{-1}): 3066 ср, 2976 ср, 1586 сл, 1499 сл, 1484 сл, 1435 с, 1398 ср, 1353 сл, 1260 с, 1231 с, 1210 сл, 1110 ср, 1033 сл, 997 сл, 938 ср, 908 ср, 848 ср, 745 ср, 723 ср, 686 ср, 546 ср, 527 с, 424 сл. (–)-ES-MS (m/z): 982.3 (10%), 1064.2 ($[\text{HWO}_2(\text{Tbc})_2]^-$, 100%), 1404.3 ($\{(\text{Ph}_4\text{P})[\text{WO}_2(\text{Tbc})_2]\}^-$, 10%).

Найдено, %: C 33.30; H 2.45; N 1.10.
Для $\text{C}_{42}\text{H}_{36}\text{NO}_6\text{PBr}_8\text{W}$
вычислено, %: C 33.52; H 2.41; N 0.93.

PCA проведен по стандартной методике на автоматическом четырехкружном дифрактометре Bruker-Nonius X8 APEX (двухкоординатный CCD детектор, $\lambda = 0.71073$ Å, графитовый монохроматор) при $T = 150$ К. Интенсивности отражений измерены методом ϕ -сканирования узких (0.5°) фреймов. Поглощение учтено эмпирически (SADABS) [15]. Структуры расшифрованы с использованием программы SHELXT [16] и уточнены с использованием программы SHELXL [17] в анизотропном приближении для неводородных атомов с использованием программной оболочки Olex2 [18]. Атомы водорода локализованы геометрически и уточнены в приближении жесткого тела. Кристаллографические характеристики комплекса и детали дифракционного эксперимента приведены в табл. 1.

Полный набор рентгеноструктурных параметров структур Ia · 2MeOH и II депонирован в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 2213900 (Ia · 2MeOH) и 2213901 (II) и могут быть получены по адресу: <http://www.ccdc.cam.ac.uk/conts/retrieving.html>).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Реакция кластерного комплекса $({}^n\text{Bu}_4\text{N})_2[\text{Mo}_3\text{Se}_7\text{Br}_6]$ с тетрабромопирокатехином (H_2Tbc) в присутствии Et_3N приводит к полному замещению бромид-ионов на хелатирующие тетрабромокатехолаты. Добавление PPh_4Br и кристаллизация из смеси CH_2Cl_2 –метанол приводит к образованию монокристаллов состава $(\text{Ph}_4\text{P})_2[\text{Mo}_3\text{Se}_7(\text{Tbc})_3] \cdot 2\text{MeOH}$ (Ia · 2MeOH). Фаза Ia · 2MeOH изоструктурна ранее опубликованному сульфидному аналогу Ib · 2MeOH [7]. Строение кластерного аниона характерно для кластеров с ядром $\{\text{Mo}_3\text{Q}_7\}^{4+}$ (Q = халькоген). Атомы Mo образуют равносторонний треугольник. Атомы Se(2), Se(4) и Se(6) диселенидных лигандов лежат практически в одной плоскости с атомами Mo, а атомы Se(3), Se(5) и Se(7) отклоняются от нее в противоположную сторону от μ_3 -шапочного се-

Таблица 1. Кристаллографические данные и параметры уточнения структур Ia · 2MeOH и II

Параметр	Значение	
	Ia · 2MeOH	II
Брутто-формула	C ₆₈ H ₄₈ O ₈ P ₂ Se ₇ Br ₁₂ Mo ₃	C ₄₂ H ₃₆ Br ₈ NO ₆ PW
<i>M</i>	2854.46	1504.82
Сингония	Моноклинная	Триклинная
Пр. группа, <i>Z</i>	<i>P</i> 2 ₁ / <i>c</i> , 4	<i>P</i> $\bar{1}$, 2
<i>a</i> , Å	21.1519(14)	9.5031(6)
<i>b</i> , Å	25.6984(12)	13.2658(8)
<i>c</i> , Å	14.6708(9)	18.8517(11)
α , град	90	85.604(2)
β , град	99.344(2)	83.843(2)
γ , град	90	74.334(2)
<i>V</i> , Å ³	7868.8(8)	2272.3(2)
<i>F</i> (000)	5336	1424
μ (MoK α), мм ⁻¹	9.895	9.658
Размер кристалла, мм	0.25 × 0.1 × 0.07	0.2 × 0.13 × 0.1
Область сбора данных 2 θ , град	3.722–48.812	3.192–52.74
Диапазоны <i>h</i> , <i>k</i> , <i>l</i>	–24 ≤ <i>h</i> ≤ 19, –25 ≤ <i>k</i> ≤ 29, –17 ≤ <i>l</i> ≤ 14	–11 ≤ <i>h</i> ≤ 11, –16 ≤ <i>k</i> ≤ 12, –23 ≤ <i>l</i> ≤ 23
Число измеренных, независимых и наблюдаемых (<i>I</i> > 2 σ (<i>I</i>)) отражений	34798, 12935, 7956	31946, 9281, 8206
Число уточняемых параметров и ограничений	905, 308	535, 0
<i>R</i> _{int}	0.0951	0.0302
GOOF по <i>F</i> ²	0.918	1.079
<i>R</i> ₁ , <i>wR</i> ₂ (<i>I</i> > 2 σ (<i>I</i>))	<i>R</i> ₁ = 0.0532, <i>wR</i> ₂ = 0.0849	<i>R</i> ₁ = 0.0204, <i>wR</i> ₂ = 0.0466
<i>R</i> ₁ , <i>wR</i> ₂ (все отражения)	<i>R</i> ₁ = 0.1119, <i>wR</i> ₂ = 0.0968	<i>R</i> ₁ = 0.0262, <i>wR</i> ₂ = 0.0478
$\Delta\rho_{\max}$, $\Delta\rho_{\min}$, e Å ⁻³	1.17/–1.21	1.00/–0.82

ленида (рис. 1). Расстояния Mo–O в *транс*-положении к μ_3 -Se на 0.04–0.10 Å длиннее расстояния в *транс*-положении к диселенидному лиганду. Геометрия кластерного аниона в Ia подобна таковой для его аналогов (Ph₄P)₂[Mo₃S₇(Tbc)₃] (**Ib**) и (Ph₄P)₂[Mo₃S₇(Tsc)₃] (**Ic**) (Tsc = тетрахлооракатехолат) (табл. 2), а несколько увеличенные длины связей Mo–Mo и Mo–Se обусловлены большим атомным радиусом Se. В структуре Ia, как и в структуре его аналога Ib, присутствуют две мо-

лекулы метанола, связанные водородными связями друг с другом и с атомом O одного из катехолатов (O(2B)···O(12) 2.877(10) Å, \angle O(2B)H(2B)O(12) 149.9°; O(4B)···O(2B) 2.702(10) Å, \angle O(4B)H(4B)O(2B) 165.7°). Кроме того, в структуре наблюдаются слабые связи между атомом O молекулы метанола и аксиальными атомами Se (O(4B)···Se(7) 2.810(8) Å, O(4B)···Se(3) 2.849(8) Å, O(4B)···Se(5) 3.110(8) Å) с расстояниями меньше суммы ван-дер-ваальсовых радиусов.

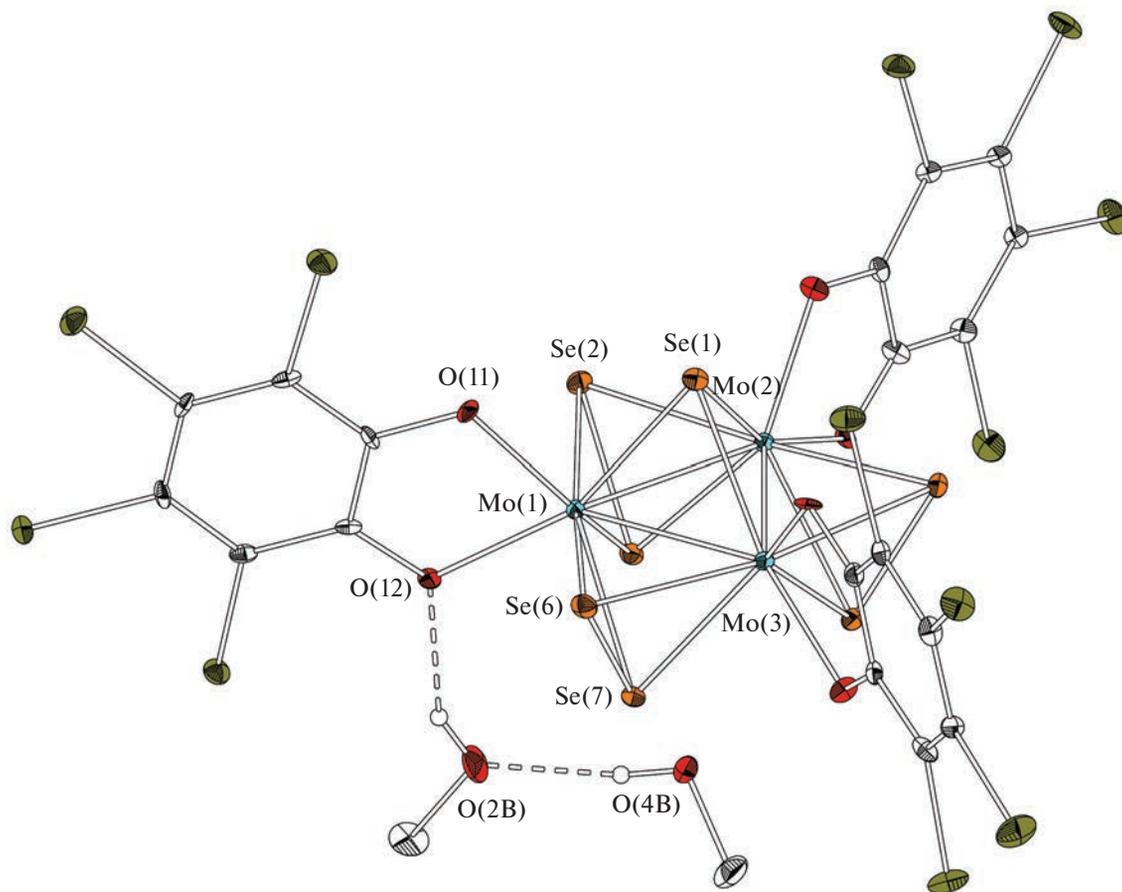


Рис. 1. Структура кластерного аниона Ia (тепловые эллипсоиды 30%-ной вероятности).

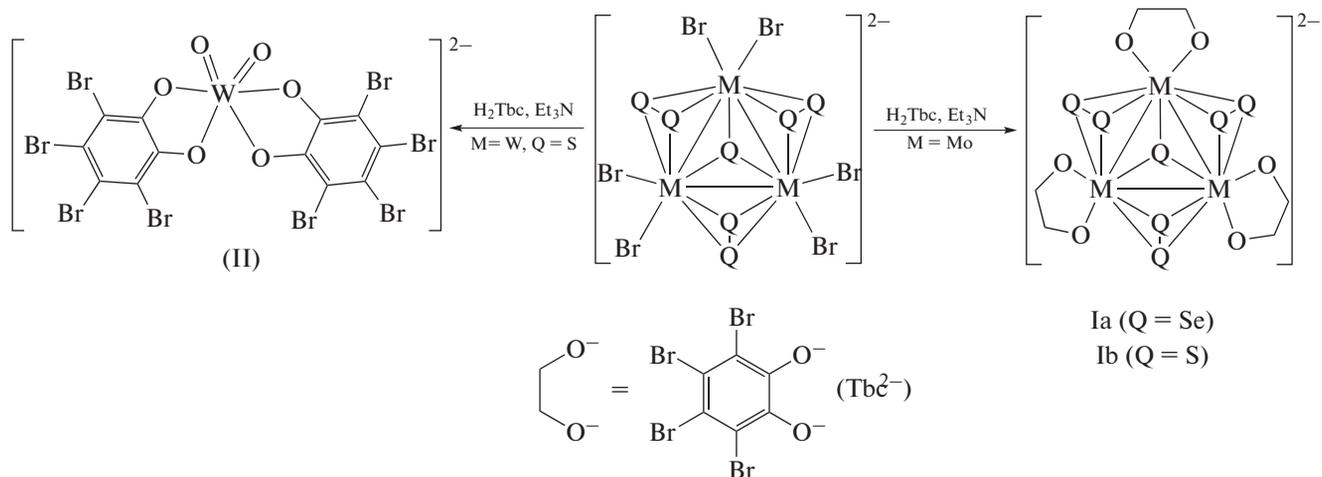


Схема 1.

Реакция вольфрамового кластера $(^n\text{Bu}_4\text{N})_2\text{[W}_3\text{S}_7\text{Br}_6]$ с тетрабромопирокатехином (H_2Tbc) в присутствии Et_3N сопровождается частичным или полным разрушением кластерного остова. После добавления к реакционной смеси PPh_4Br и кристаллизации удалось выделить с небольшим вы-

ходом единственный продукт – мооядерный комплекс шестивалентного вольфрама $(\text{Ph}_4\text{P})(\text{Et}_3\text{NH})[\text{WO}_2(\text{Tbc})_2]$. В комплексном анионе два фрагмента $\text{W}=\text{O}$ находятся в *цис*-конфигурации, что типично для диоксокомплексов ранних переходных металлов (рис. 2). Расстояния $\text{W}=\text{O}$ равны

Таблица 2. Избранные геометрические параметры кластерного аниона в комплексе Ia и его аналогах

Связь	(Ph ₄ P) ₂ [Mo ₃ Se ₇ (Tbc) ₃] (Ia)	(Ph ₄ P) ₂ [Mo ₃ S ₇ (Tbc) ₃] (Ib)	(Ph ₄ P) ₂ [Mo ₃ S ₇ (Tcc) ₃] (Ic)
	d, Å		
Mo–Mo	2.7904(12)–2.8074(11)	2.7501(6)–2.7647(6)	2.7526(12)–2.7631(12)
Mo–(μ ₃ -Q)	2.4768(14)–2.4885(14)	2.3602(11)–2.3653(10)	2.363(2)–2.369(2)
Mo–(μ-Q)	2.5275(12)–2.6652(13)	2.3972(11)–2.5348(10)	2.398(3)–2.530(3)
Mo–O	2.050(7)–2.159(6)	2.049(2)–2.139(2)	2.054(6)–2.115(5)
Угол	ω, град		
MoMoMo	59.64(3)–60.24(3)	59.668(17)–60.194(16)	59.75(3)–60.13(3)
Литература	Настоящая работа	[7]	[6]

1.7336(19) и 1.7534(18) Å, угол O(1)W(1)O(2) – 102.04(9)°. Длины связей W–O_{Tbc} существенно отличаются, связь в *транс*-положении к оксогруппе существенно (на 0.11–0.15 Å) длиннее, что иллюстрирует сильные π-донорные свойства оксогруппы. Как следствие, средняя длина связи W–O_{Tbc} (2.065 Å) в комплексе II существенно больше таковой в комплексе [W₂(Tcc)₆] (1.940 Å) [19].

Состав комплексов Ia и II подтвержден методом электроспрей-масс-спектрометрии. Основной пик для Ia с m/z = 1055.7 соответствует дианиону [Mo₃Se₇Tbc₃]²⁻, также присутствует пик меньшей интенсивности с m/z = 2449.3, соответствующий аддукту {(Ph₄P)[Mo₃Se₇(Tbc)₃]}⁻. Основной пик в спектре комплекса II соответствует форме [HWO₂(Tbc)₂]⁻ (m/z = 1064.2).

Образование комплекса II вместо ожидаемого [W₃S₇(Tbc)₃]²⁻ может быть следствием относитель-

ной легкости окисления вольфрама по сравнению с молибденом до высшей степени окисления. Примечательно также, что [Mo₃S₇(Tbc)₃]²⁻ устойчив на воздухе как в твердом виде, так и в растворе, тогда как [Mo₃Se₇(Tbc)₃]²⁻ образуется с меньшим выходом, а при длительном выдерживании в растворе разлагается. Также можно усмотреть влияние лиганда на продукт окисления: кластеры [M₃Q₄L₃]²⁻ (M = Mo, W; L = дитиолен) окисляются с образованием пятивалентных комплексов [M₂^V(μ-Q)₂O₂L₂]²⁻ [20], тогда как, предположительно, образующийся на первой стадии кластер [W₃S₇(Tbc)₃]²⁻, по-видимому, окисляется на воздухе до комплекса шестивалентного вольфрама [W^{VI}O₂(Tbc)₂]²⁻ (II). Для изучения этого вопроса комплексы Ia, Ib и Ic были исследованы методом ЦВА.

На циклических вольтамперограммах комплексов Ia, Ib и Ic в ацетонитриле (рис. S1–S3)

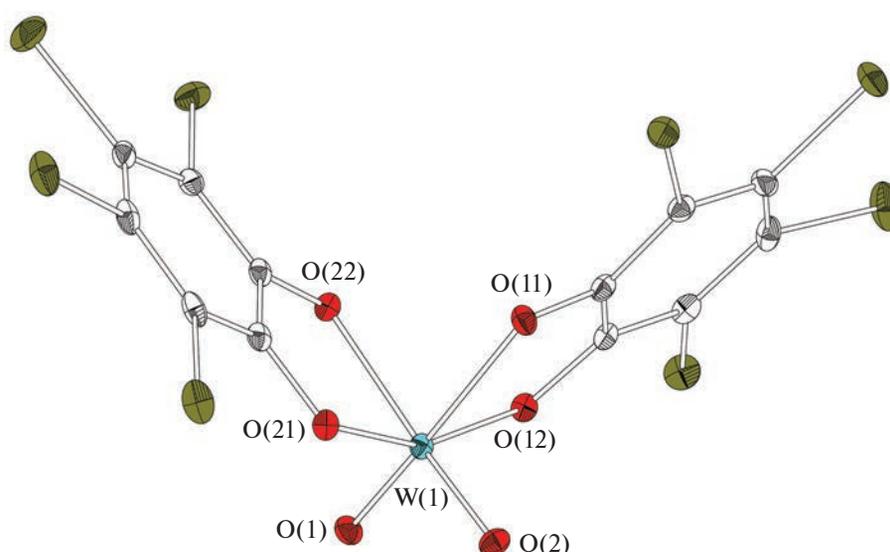


Рис. 2. Структура анионной части комплекса II (тепловые эллипсоиды 30%-ной вероятности).

Таблица 3. Окислительно-восстановительные потенциалы^a, определенные для комплексов методом ЦВА в растворе CH₃CN

Соединение	Окисление, В	Восстановление, В
(Ph ₄ P) ₂ [Mo ₃ Se ₇ (Bbc) ₃] (Ia)	0.44 ^b (119 ^b), 0.80 ^г	-1.49, -1.88 ^д
(Ph ₄ P) ₂ [Mo ₃ S ₇ (Tbc) ₃] (Ib)	0.73 ^b (96 ^b), 0.91 ^г	-1.04, -1.89 ^д
(Ph ₄ P) ₂ [Mo ₃ S ₇ (Tcc) ₃] (Ic)	0.75 ^b (66 ^b), 0.95 ^г	-1.08, -1.89 ^д

^a E, В относительно Ag/AgCl.

^b Обратимое, $E_{1/2} = (E_a + E_c)/2$.

^в ΔE, мВ; ΔE = |E_a - E_c|.

^г Необратимое, E_{ра}.

^д Необратимое, E_{рс}.

наблюдается группа катодных пиков, относящихся к окислительно-восстановительным превращениям кластерного ядра {Mo₃Q₇}⁴⁺, а также группа анодных процессов, которая определяется, в первую очередь, наличием редокс-активного катехолатного лиганда. Соответствующие данные суммированы в табл. 3. Катодные процессы для всех комплексов полностью необратимы, так как связаны с разрушением кластерного ядра {Mo₃Q₇}⁴⁺ в результате его восстановления. Хорошо известно, что восстановление трех дихалькогенидных лигандов в кластере {Mo₃Q₇}⁴⁺ приводит к образованию кластера {Mo₃Q₄}⁴⁺ [1]. Первый анодный процесс является квазиобратимым (разность потенциалов ΔE заметно отклоняется от теоретического значения 57 мВ для Ia, Ib) и, наиболее вероятно, обусловлен двухэлектронным окислением с образованием нейтрального комплекса [Mo₃Q₇(Tbc)₃]. Обратный катодный пик, соответствующий этому процессу, значительно интенсивнее. Такая заметная асимметрия формы анодного и катодного пиков может свидетельствовать об отклонении на поверхности электрода электропроводящих частиц ([Mo₃Q₇(Tbc)₃]) в результате окисления. Подобное поведение наблюдалось в более ранних исследованиях родственных кластеров {Mo₃Q₇}⁴⁺ с редокс-активными дитиолоновыми лигандами [3, 4]. В частности, для (Bu₄N)₂[Mo₃S₇(Dmit)₃] (Dmit = 1,3-дитиол-2-тион-4,5-дитиолат C₃S₅²⁻) был обнаружен квазиобратимый процесс двухэлектронного окисления при 0.38 В относительно Ag/AgCl. Было доказано, что продуктом окисления является нейтральный комплекс [Mo₃S₇(Dmit)₃], обладающий электронной проводимостью [3].

Наличие более тяжелого халькогена (Se) в Ia существенным образом влияет на положение потенциала окисления. В комплексе Ia первый потенциал окисления наблюдается около 0.44 В (относительно Ag/AgCl), в то время как в Ib и Ic он сдвинут в более анодную область на 0.3 В. Это согласуется с общей тенденцией более легкого окисления селенидных кластеров по сравнению с сульфидными аналогами. С другой стороны,

здесь прослеживается явное влияние редокс-активного лиганда. В сравнении с дитиолоновыми комплексами (Bu₄N)₂[Mo₃S₇(Dmit)₃] (0.38 В) и (Bu₄N)₂[Mo₃Se₇(Dmit)₃] (0.15 В) потенциалы окисления для Ia, Ib и Ic заметно выше, т.е. катехолатные комплексы окисляются труднее, чем дитиолоновые.

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 121031700313-8 и 121031700315-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуцин А.Л., Ларичева Ю.А., Соколов М.Н., Llusar R. // Успехи химии. 2018. Т.87. С. 670 (Gushchin A.L., Laricheva Y.A., Sokolov M.N., Llusar R. // Russ. Chem. Rev. 2018. V. 87. P. 670).
<https://doi.org/10.1070/RCR4800>
2. Llusar R., Vicent C. // Coord. Chem. Rev. 2010. V. 254. P. 1534.
3. Llusar R., Uriel S., Vicent C. et al. // J. Am. Chem. Soc. 2004. V. 126. P. 12071.
4. Gushchin A.L., Llusar R., Vicent C. et al. // Eur. J. Inorg. Chem. 2013. P. 2615.
5. Гуцин А.Л., Абрамов П.А., Пересыпкина Е.В., Соколов М.Н. // Коорд. химия. 2013. Т. 39. С. 8 (Gushchin A.L., Abramov P.A., Peresypkina E.V., Sokolov M.N. // Russ. J. Coord. Chem. 2013. V. 39. P. 6).
<https://doi.org/10.1134/S1070328413010041>
6. Falvello L.R., Llusar R., Triguero S., Vicent C. // Chem. Commun. 2009. P. 3440.
7. Petrov P.A. // J. Cluster Sci. 2017. V. 28. P. 1815.
8. Петров П.А., Афонин М.Ю., Наумов Д.Ю. и др. // Коорд. химия. 2015. Т. 41. С. 34 (Petrov P.A., Afonin M.Yu., Naumov D.Yu. et al. // Russ. J. Coord. Chem. 2015. V. 41. P. 31).
<https://doi.org/10.1134/S1070328415010078>
9. Matsumoto T., Yano H., Wakizaka M. et al. // Bull. Chem. Soc. Jpn. 2015. V. 88. P. 74.

10. *Petrov P.A., Nadolinny V.A., Bogomyakov A.S., Sukhikh T.S.* // *New J. Chem.* 2018. V. 42. P. 12349.
11. *Sokolov M.N., Abramov P.A., Gushchin A.L. et al.* // *Inorg. Chem.* 2005. V. 44. P. 8116.
12. *Gushchin A.L., Sokolov M.N., Peresypkina E.V. et al.* // *Eur. J. Inorg. Chem.* 2008. P. 3964.
13. *Вировец А.В., Гуцин А.Л., Абрамов П.А. и др.* // *Журн. структур. химии.* 2006. Т. 47. С. 332 (*Virovets A.V., Gushchin A.L., Abramov P.A. et al.* // *J. Struct. Chem.* 2006. V. 47. P. 326).
<https://doi.org/10.1007/s10947-006-0303-y>
14. *Gushchin A.L., Ooi B.-L., Harris P. et al.* // *Inorg. Chem.* 2009. V. 48. P. 3832.
15. APEX2 (version 1.08), SAINT (version 7.03), SADABS (version 2.11), SHELXTL (version 6.12). Madison (WI, USA): Bruker AXS Inc., 2004.
16. *Sheldrick G.M.* // *Acta Crystallogr. A.* 2015. V. 71. P. 3.
17. *Sheldrick G.M.* // *Acta Crystallogr. C.* 2015. V. 71. P. 3.
18. *Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al.* // *J. Appl. Cryst.* 2009. V. 42. P. 339.
19. *DeLearie L.A., Pierpont C.G.* // *Inorg. Chem.* 1988. V. 27. P. 3842.
20. *Llusar R., Triguero S., Vicent C. et al.* // *Inorg. Chem.* 2005. V. 44. P. 8937.