

УДК 47–386+541.49

1,2,4-ТРИФЕНИЛЦИКЛОПЕНТАДИЕНИЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ПРАЗЕОДИМА И ЭРБИЯ

© 2023 г. С. С. Дегтярева^{1, 2}, Д. А. Бардонов^{1, 2}, К. А. Лысенко^{2, 3}, М. Е. Миняев^{1, 4},
И. Э. Нифантьев^{1, 2, 3}, Д. М. Ройтерштейн^{1, 2, 4, *}

¹Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Москва, Россия

²Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН, Москва, Россия

*e-mail: roiter@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.12.2022 г.

После доработки 09.02.2023 г.

Принята к публикации 15.02.2023 г.

Взаимодействие трифенилциклопентадиенилкаталя с тетрагидрофуранатами хлоридов празеодима и эрбия, в зависимости от соотношения реагентов, приводит к образованию тетраядерных ат-комплексов $\{[(\text{Ph}_3\text{C}_5\text{H}_2)\text{Pr}(\text{THF})]_2(\mu_2\text{-Cl})_2(\mu_3\text{-Cl})_3\text{K}\}_2(\text{C}_7\text{H}_8)_4$ (I) и $\{[(\text{Ph}_3\text{C}_5\text{H}_2)\text{Er}(\text{THF})]_2(\mu_2\text{-Cl})_2(\mu_3\text{-Cl})_3\text{K}(\text{THF})\}_2$ (III); и биядерных ат-комплексов $[(\text{Ph}_3\text{C}_5\text{H}_2)_2\text{LnCl}(\text{KCl})]_2$ Ln = Pr (II), Er (IV) (ССДС № 2224244 (I), 2224243 (II), 2224245 (III), 2224242 (IV)). В основе сходных по строению комплексов I и III лежит остов $\{[\text{Ln}_2(\mu\text{-Cl})_3]_2(\mu\text{-Cl})_2\text{K}_2\}$, в III катион калия дополнительно координирован молекулой ТГФ. В основе строения изоструктурных II и IV биядерный остов $[\text{Ln}(\mu\text{-Cl})_2\text{K}]_2$.

Ключевые слова: лантаниды, трифенилциклопентадиенильный лиганд, рентгеноструктурный анализ

DOI: 10.31857/S0132344X22600540, **EDN:** SAGZHE

Замещенные циклопентадиенильные лиганды играют важную роль в дизайне и синтезе металлоорганических соединений 4f-элементов [1–4]. Большое разнообразие таких лигандов и одновременно интерес к ним обусловлены легкостью модификации циклопентадиенильного лиганда. Арилзамещенные циклопентадиенильные лиганды в этом плане особенно перспективны, благодаря возможности их модификации как за счет использования различного числа заместителей в циклопентадиенильном кольце, так и путем введения заместителей в арильный фрагмент [5–8]. Ранее мы сообщали о получении серии полифенилзамещенных циклопентадиенильных ат-комплексов гадолиния, неодима и тербия. В ряду этих соединений на примере моно- и бистрифенилциклопентадиенильных комплексов были обнаружены два устойчивых структурных мотива: биядерный остов $[\text{Ln}(\mu\text{-Cl})_2\text{K}]_2$ для бисциклопентадиенильных комплексов $[\text{Cr}_2^{\text{Ph}_3}\text{Ln}(\mu_2\text{-Cl})(\mu_3\text{-Cl})\text{K}(\text{THF})_n]_2$, $n = 0$ (Ln = Gd, Tb), $n = 2$ (Ln = Nd), и тетраядерный остов $\{[\text{Ln}_2(\mu\text{-Cl})_4]_2(\mu\text{-Cl})_2\text{K}_2\}$ для моноциклопентадиенильных комплексов $\{[\text{Cr}^{\text{Ph}_3}\text{Ln}(\text{THF})]_2(\mu_2\text{-Cl})_2(\mu_3\text{-Cl})_3\text{K}(\text{THF})_n\}_2$, $n = 0$ (Ln = Nd), 1 (Ln = Gd, Tb) [9–11].

Представлялось интересным изучить структурные особенности аналогичных трифенилциклопентадиенильных комплексов лантанидов с большим и меньшим ионным радиусом, чем тербий и гадолиний, находящихся в середине 4f-ряда. Предполагалось, что движение к началу и/или к концу 4f-ряда, сопровождающееся соответствующим изменением ионных радиусов, приведет к перестройке координационной сферы ионов РЗЭ в этих комплексах.

Цель настоящей работы – синтез и изучение структуры моно- и бистрифенилциклопентадиенильных комплексов эрбия и празеодима и сопоставление особенностей их строения с родственными соединениями тербия, гадолиния и неодима.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез соединений I–IV проводили в атмосфере предварительно очищенного аргона в среде безводных растворов с использованием перчаточного бокса СПЕКС-ГБ2. Тетрагидрофуран предварительно высушивали над NaOH и перегоняли над калием/бензофеноном. Гексан перегоняли над калий-натриевой эвтектикой/бензофеноном. Толуол перегоняли над натрием/бензофеноном.

$\text{PrCl}_3(\text{THF})_2$ и $\text{ErCl}_3(\text{THF})_3$ получали в соответствии с известной методикой [12]. Бензилкалий получали по модифицированной литературной методике [13]. 1,2,4-Трифенилциклопентадиен получали по известной методике [14], перекристаллизовывали из абсолютного спирта и высушивали в динамическом вакууме. Элементный анализ комплексов I–III выполняли на приборе Thermo Scientific FLASH 2000 CHNS/O Analyzer. Элементный анализ комплекса IV проводили на приборе Perkin-Elmer 24000 Series II elemental CHNS/O. Содержание металла определяли комплексонометрическим титрованием ЭДТА с индикатором ксиленоловым оранжевым.

Синтез $[(\text{Ph}_3\text{C}_5\text{H}_2)\text{Pr}(\text{THF})_2(\mu_2\text{-Cl})_2(\mu_3\text{-Cl})_3\text{K}]_2(\text{C}_7\text{H}_8)_4$ (I). Раствор 0.265 г (2.04 ммоль) бензилкалия в 5 мл ТГФ медленно, при перемешивании, добавляли к 10 мл раствора 0.588 г (2 ммоль) 1,2,4-трифенилциклопентадиена в ТГФ. Реакционную смесь перемешивали в течение 15 мин, полученный раствор 1,2,4-трифенилциклопентадиенилкалия медленно прибавляли к перемешиваемой суспензии $\text{PrCl}_3(\text{THF})_2$ (0.783 г, 2 ммоль) в 6 мл ТГФ. Реакционную смесь перемешивали 12 ч, затем центрифугировали для отделения осадка хлорида калия. Осадок промывали 5 мл ТГФ и снова центрифугировали. Супернатант объединяли и упаривали досуха. Полученное вязкое масло растворяли в 15 мл толуола, к раствору аккуратно добавляли 20 мл гексана, избегая смешения слоев. Через 10 дней образовались ярко-зеленые кристаллы комплекса I. Кристаллы высушивали в динамическом вакууме. Выход комплекса I 0.764 г (0.289 ммоль, 58%).

Найдено, %: C 55.70; H 4.65; Pr, 20.87.
Для $\text{C}_{122}\text{H}_{116}\text{O}_4\text{Cl}_{10}\text{K}_2\text{Pr}_4$
вычислено, %: C 55.45; H 4.43; Pr, 21.35.

Пригодные для рентгеноструктурного анализа (РСА) кристаллы получали в результате медленной диффузии гексана в раствор I в толуоле. Судя по данным РСА, элементарная ячейка комплекса I содержит четыре молекулы толуола. Две из этих молекул теряются при высушивании в вакууме.

Синтез $[(\text{Ph}_3\text{C}_5\text{H}_2)_2\text{PrCl}(\text{KCl})_2$ (II) выполняли по методике, аналогичной для комплекса I, исходя из 0.530 г (4.08 ммоль) бензилкалия, 1.176 г (4 ммоль) 1,2,4-трифенилциклопентадиена и 0.783 г, (2 ммоль) $\text{PrCl}_3(\text{THF})_2$. Выход II 0.787 г (0.470 ммоль, 47%).

Найдено, %: C 66.05; H 4.19; Pr, 16.99.
Для $\text{C}_{92}\text{H}_{68}\text{Cl}_4\text{K}_2\text{Pr}_2$
вычислено, %: C 65.96; H 4.10; Pr, 16.84.

Синтез $[(\text{Ph}_3\text{C}_5\text{H}_2)\text{Er}(\text{THF})_2(\mu_2\text{-Cl})_2(\mu_3\text{-Cl})_3\text{K}(\text{THF})_2$ (III) выполняли по методике, аналогичной для комплекса I, исходя из 0.265 г (2.04 ммоль) бензилкалия, 0.588 г (2 ммоль) 1,2,4-трифенилциклопентадиена и (0.979 г, 2 ммоль) $\text{ErCl}_3(\text{THF})_3$. Выход комплекса III 0.641 г (0.237 ммоль, 47%).

Найдено, %: C 51.75; H 4.34.
Для $\text{C}_{116}\text{H}_{116}\text{O}_6\text{Cl}_{10}\text{K}_2\text{Er}_4$
вычислено, %: C 51.45; H 4.32.

Пригодные для РСА кристаллы получали в результате медленной диффузии гексана в раствор III в ТГФ.

Синтез $[(\text{Ph}_3\text{C}_5\text{H}_2)_2\text{ErCl}(\text{KCl})_2$ (IV) выполняли по методике, аналогичной для комплекса I, исходя из 0.265 г (2.04 ммоль) бензилкалия, 0.588 г (2 ммоль) 1,2,4-трифенилциклопентадиена и 0.490 г (1 ммоль) $\text{ErCl}_3(\text{THF})_3$. При выделении IV вязкое масло, образовавшееся при упаривании реакционной смеси после центрифугирования промывали 10 мл толуола, отделяли розовый осадок центрифугированием и растворяли его в 15 мл ТГФ. К раствору аккуратно добавляли 20 мл гексана, избегая смешения слоев. Через 10 дней образовались розовые кристаллы. После высушивания в вакууме выход кристаллов составил 0.062 г. К маточному раствору добавляли еще 20 мл гексана, при этом дополнительно образовалось еще 0.139 г IV. Суммарный выход IV 0.201 г (0.201 ммоль, 23%).

Найдено, %: C 62.94; H 4.09.
Для $\text{C}_{92}\text{H}_{68}\text{Cl}_4\text{K}_2\text{Er}_2$
вычислено, %: C 63.95; H 3.97.

Пригодные для РСА кристаллы получали в результате медленной диффузии гексана в раствор IV в ТГФ. Заниженные данные элементного анализа в случае комплекса IV, так же как и низкий выход, заставляют предполагать, что выделенный монокристаллический образец не является основным продуктом данной реакции, а представляет собой лишь одно из нескольких соединений. Действительно, при воспроизведении синтеза IV в ряде случаев из реакционной смеси был выделен в кристаллическом виде сольват 1,2,4-трифенилциклопентадиенилкалия.

РСА комплексов I–IV проведен на дифрактометре Bruker Quest D8 (детектор Photon-III, MoK_α -излучение, графитовый монохроматор, ω -сканирования). Интенсивности отражений получены по программе SAINT [15]. Учет поглощения кристаллом проведен полуэмпирически по эквивалентным отражениям в программе SADABS [16]. Структуры расшифрованы прямым методом в программе SHELXT [17] и уточнены

Таблица 1. Основные кристаллографические данные и параметры уточнения для соединений I–IV

Параметр	Значение			
	I	II	III	IV
Брутто-формула	$C_{108}H_{100}O_4Cl_{10}K_2Pr_4 \cdot 4(C_7H_8)$	$C_{92}H_{68}Cl_4K_2Pr_2$	$C_{116}H_{116}O_6Cl_{10}K_2Er_4$	$C_{92}H_{68}Cl_4K_2Er_2$
<i>M</i>	2826.74	1675.28	2707.82	1727.98
<i>T</i> , К	112	105	100	123
Кристаллическая система	Моноклинная	Ромбическая	Моноклинная	Ромбическая
Пр. группа	<i>C2/c</i>	<i>Iba2</i>	<i>P2₁/n</i>	<i>Iba2</i>
<i>Z</i> (<i>Z'</i>)	8 (1)	8 (1)	2 (0.5)	8 (1)
<i>a</i> , Å	24.9719(14)	17.5395(8)	13.3267(2)	17.420(3)
<i>b</i> , Å	17.1060(10)	25.2497(15)	33.6011(6)	25.059(3)
<i>c</i> , Å	29.7298(16)	16.9294(10)	13.5223(2)	16.884(3)
β , град	102.940(2)	90	116.6339(7)	90
<i>V</i> , Å ³	12377.2(12)	7497.5(7)	5412.65(15)	7370.6(18)
ρ (выч.), г см ⁻³	1.517	1.484	1.661	1.557
μ , мм ⁻¹	1.883	1.585	3.447	4.744
<i>F</i> (000)	5696	3376	2680	3448
$2\theta_{\max}$, град (полнота)	58 (0.998)	58 (0.999)	60 (0.999)	52 (0.999)
Число измеренных отражений	51262	34379	195071	15698
Число независимых отражений	16384	9932	15766	7163
Число отражений с $I > 2\sigma(I)$	12284	7169	14559	5174
Количество уточняемых параметров	709	452	668	452
R_1 ($I > 2\sigma(I)$)	0.0530	0.0561	0.0287	0.0626
wR_2 (все данные)	0.1161	0.1166	0.0625	0.1460
GOOF	1.030	0.990	1.116	0.945
Остаточная электронная плотность (min/max), e Å ⁻³	-1.120/1.098	-0.815/0.906	-1.501/1.604	-0.828/1.627

МНК в анизотропном полноматричном приближении по F_{hkl}^2 в программе SHELXL-2018 [18]. При уточнении разупорядоченных фрагментов использованы ограничения для параметров атомных смещений и позиционных параметров (DFIX и EADP). Атомы водорода во всех структурах рассчитаны по модели жесткого тела (расстояние C–H = 0.950 Å для ароматических, 0.990 Å для метиленовых и 1.000 Å для циклопентадиенильных атомов водорода) и уточнены в относительном изотропном приближении $U_{\text{изо}}(\text{H}) = 1.2U_{\text{экв}}(\text{C})$. Основные кристаллографические данные и параметры уточнения для соединений I–IV приведены в табл. 1.

Координаты атомов и другие параметры структур I–IV депонированы в Кембриджском

банке структурных данных (CCDC № 2224242–2224245, deposit@ccdc.cam.ac.uk или http://www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Действием раствора 1,2,4-трифенилциклопентадиенилкалия в ТГФ на суспензию тетрагидрофураната хлорида празеодима $\text{PrCl}_3(\text{THF})_2$ в ТГФ, в зависимости от соотношения реагентов, были получены ат-комплексы $[\{\text{Cp}^{\text{Ph}_3}\text{Pr}(\text{THF})\}_2(\mu_2\text{-Cl})_2(\mu_3\text{-Cl})_3\text{K}]_2$ (I) и $[\text{Cp}_2^{\text{Ph}_3}\text{PrCl}(\text{KCl})]_2$ (II) (ТГФ = тетрагидрофуран, $\text{Cp}^{\text{Ph}_3} = 1,2,4$ -трифенилциклопентадиенил) (схема 1).

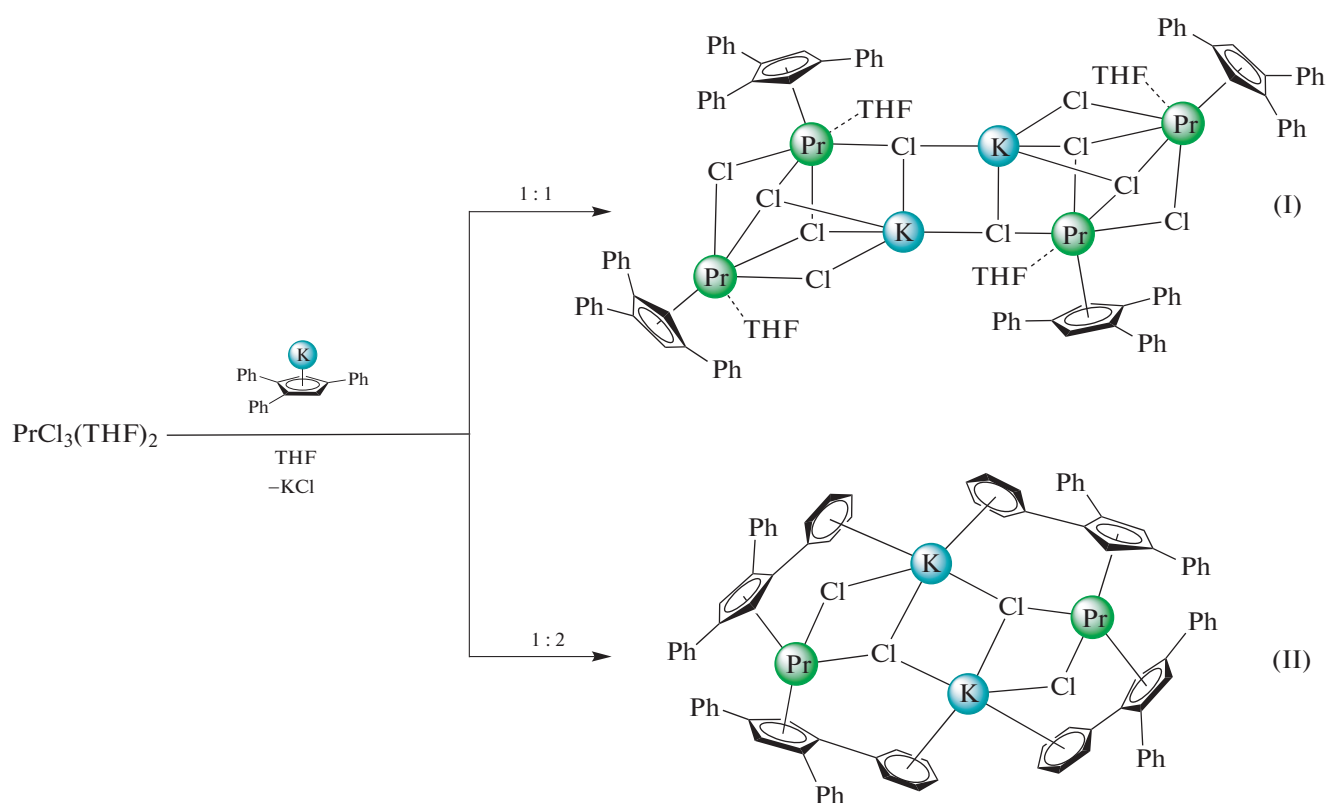


Схема 1.

Строение полученных соединений установлено методом РСА. Комплекс I состоит из двух эквивалентных фрагментов $[\{\text{Cp}^{\text{Ph}_3}\text{Pr}(\text{THF})\}_2(\mu_2\text{-Cl})_2(\mu_3\text{-Cl})_3\text{K}]$, объединенных двумя связями K–Cl (рис. 1). Комплекс I изоструктурен аналогичному комплексу неодима $[\{\text{Cp}^{\text{Ph}_3}\text{Nd}(\text{THF})\}_2(\mu_2\text{-Cl})_2(\mu_3\text{-Cl})_3\text{K}]_2$ [11], однако отличается от аналогичных трифенилциклопентадиенильных комплексов гадолиния и тербия $[\{\text{Cp}^{\text{Ph}_3}\text{Ln}(\text{THF})\}_2(\mu_2\text{-Cl})_2(\mu_3\text{-Cl})_3\text{K}(\text{THF})]_2$ [9] (Ln = Gd, Tb) координационным окружением ионов калия: в комплексе I ион калия координиро-

ван четырьмя μ_3 -мостиковыми и одним μ_2 -мостиковым атомом хлора, а также η^6 -координирован фенильным заместителем одного из циклопентадиенильных лигандов, тогда как в комплексах $[\{\text{Cp}^{\text{Ph}_3}\text{Ln}(\text{THF})\}_2(\mu_2\text{-Cl})_2(\mu_3\text{-Cl})_3\text{K}(\text{THF})]_2$ ион калия, помимо пяти хлоридных лигандов, координирован атомом кислорода молекулы ТГФ и η^2 -координирован фенильной группой.

Каждый из двух неэквивалентных катионов празеодима в I координирован четырьмя мостиковыми хлоридными лигандами, атомом кислорода

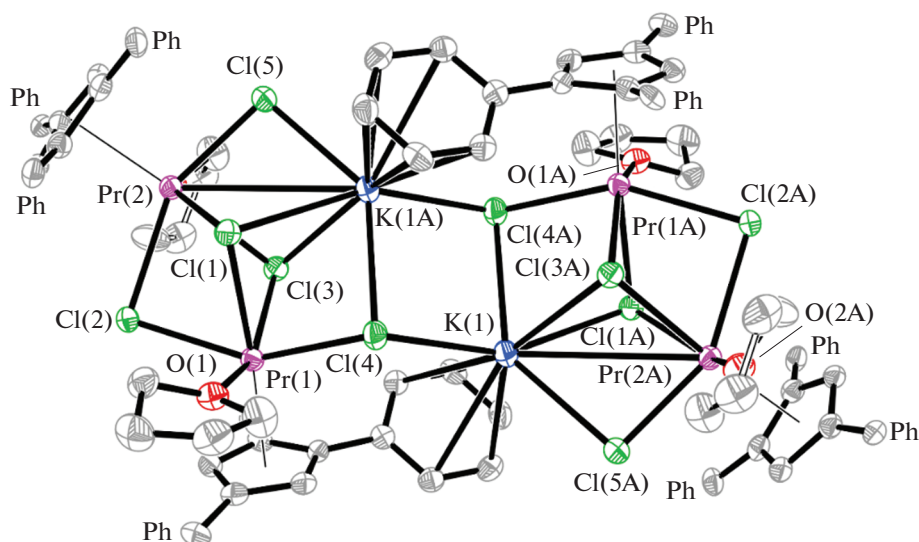


Рис. 1. Молекулярное строение комплекса I в представлении атомов эллипсоидами тепловых колебаний ($\rho = 50\%$). Атомы водорода, часть фенильных групп и разупорядоченность координированных молекул ТГФ не показаны.

молекулы ТГФ и η^5 -циклопентадиенильным анионом (КЧ 8). Значения углов разворота фенильных колец относительно циклопентадиенильного кольца находятся в диапазоне от 8.7° до 44.9° , при этом значения углов разворота фенильных колец в положении 4 циклопентадиенильного аниона заметно меньше соответствующих значений для фенильных колец в положениях 1 и 2 (см. табл. 2).

Интересно, что практически все моноарилциклопентадиенильные комплексы лантанидов, не содержащие иных лигандов, кроме циклопентадиенильного и галогенидного, содержат структурный мотив $[M_4K_2Cl_{10}]$ [9, 11, 19–21]. Единственным исключением является комплекс $[Cp^{Ph^3}YCl_2(THF)_3]$, имеющий моноядерное строение [22]. Известен пример подобного структурного мотива и в химии *d*-металлов [23].

Бисциклопентадиенильный комплекс II, так же как и I, расположен на центре инверсии (рис. 2). Он относится к достаточно редкому в лантанидоорганической химии структурному типу ат-комплекса, в котором катион щелочного металла не координируется.

Бисциклопентадиенильный комплекс II, так же как и I, расположен на центре инверсии (рис. 2). Он относится к достаточно редкому в лантанидоорганической химии структурному типу ат-комплекса, в котором катион щелочного металла не координируется.

Таблица 2. Основные структурные параметры комплексов I–IV

Параметр	I	II	III	IV
Длины связей Ln–C _{Ср} , Å	2.733(5)–2.833(5)	2.735(8)–2.829(8)	2.626(2)–3.751(3)	2.61(1)–2.71(2)
Расстояния Ln–C _р центроид, Å	2.505, 2.516	2.497, 2.500	2.393, 2.405	2.358, 2.364
Длины связей Ln–Cl, Å	2.692(1)–2.920(1)	2.680(2), 2.721(2)	2.5658(9)–2.8750(7)	2.560(4), 2.598(4)
Длины связей Ln–O _{ТГФ} , Å	2.449(3), 2.461(3)		2.338(3)–2.345(2)	
Углы разворота фенильных колец в положениях 1 и 2 циклопентадиенильного кольца, град	28.9, 44.9; 38.4, 40.9	35.1, 38.6; 19.3, 59.4	35.6, 38.3; 30.1, 37.4	36.2, 39.8; 18.0, 58.7
Углы разворота фенильных колец в положении 4 циклопентадиенильного кольца, град	8.7; 14.8	15.4; 22.5	18.1; 19.5	16.9; 22.8
Расстояния K...C _{Ph} , Å	3.050(5)–2.562(4)	3.05(1)–3.513(9)	3.234(4), 3.332(4), 3.580(4)	3.06(2)–3.41(2)

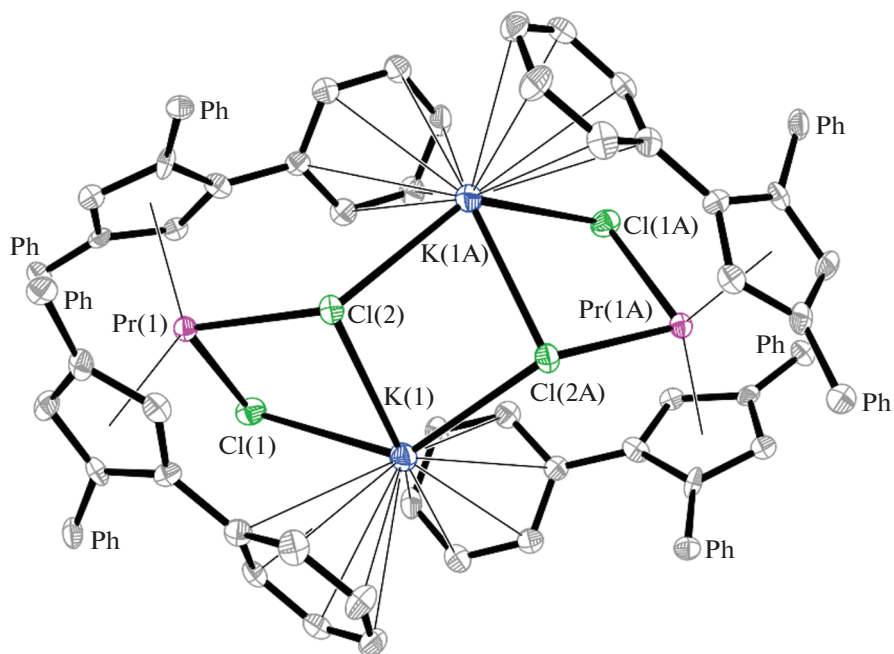


Рис. 2. Молекулярное строение комплекса II в представлении атомов эллипсоидами тепловых колебаний ($\rho = 50\%$). Атомы водорода и часть фенильных групп не показаны

ван O- или N-донорным лигандом: $[Cr_2LnX_2M]$, где Cr – замещенный или незамещенный циклопентадиенильный лиганд, X – анионный лиганд, M –

катион щелочного металла. Для празеодима комплексы такого типа ранее не были известны.

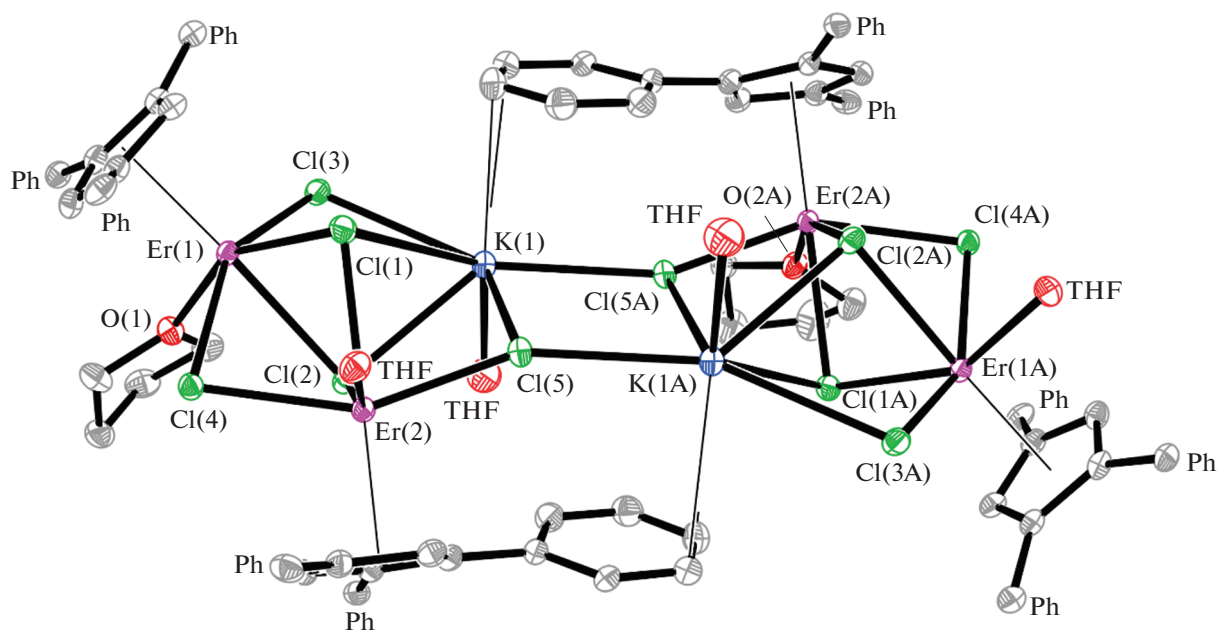


Рис. 3. Молекулярное строение комплекса III в представлении атомов эллипсоидами тепловых колебаний ($\rho = 50\%$). Атомы водорода, часть фенильных групп и атомы углерода молекул ТГФ не показаны для упрощения рисунка.

Ион празеодима в комплексе II координирован двумя η^5 -циклопентадиенильными лигандами и двумя хлоридными лигандами (КЧ 8), как и в случае комплекса I. При этом расстояние $\text{Pr}-\text{Cp}_{\text{центроид}}^{\text{Ph}_3}$ для бисциклопентадиенильного комплекса несколько меньше (среднее расстояние 2.498 Å), чем для моноциклопентадиенильного комплекса (среднее расстояние 2.510 Å). В то же время средние значения углов разворота фенильных колец относительно циклопентадиенильного кольца для II значительно выше, чем для I. Средние значения углов разворота составляют 38.1° (II) и 29.3° (I) для фенильных колец в положениях 1 и 2 циклопентадиенильного лиганда, и

18.9° (II) и 11.7° (I) для фенильных колец 4-ом положении соответственно. Такое значительное различие может говорить о большей стерической нагруженности иона празеодима в комплексе II, по сравнению с комплексом I.

Комплекс II изоструктурен описанным ранее аналогичным соединениям гадолиния и тербия [9].

Комплексы эрбия $[\{\text{Cp}^{\text{Ph}_3}\text{Er}(\text{THF})\}_2(\mu_2\text{-Cl})_2(\mu_3\text{-Cl})_3\text{K}(\text{THF})_2]$ (III) и $[\text{Cp}_2^{\text{Ph}_3}\text{ErCl}(\text{KCl})_2]$ (IV) получены по аналогии с комплексами празеодима (схема 2). Комплексы III и IV были выделены из реакций перекристаллизацией из смесей ТГФ–гексан.

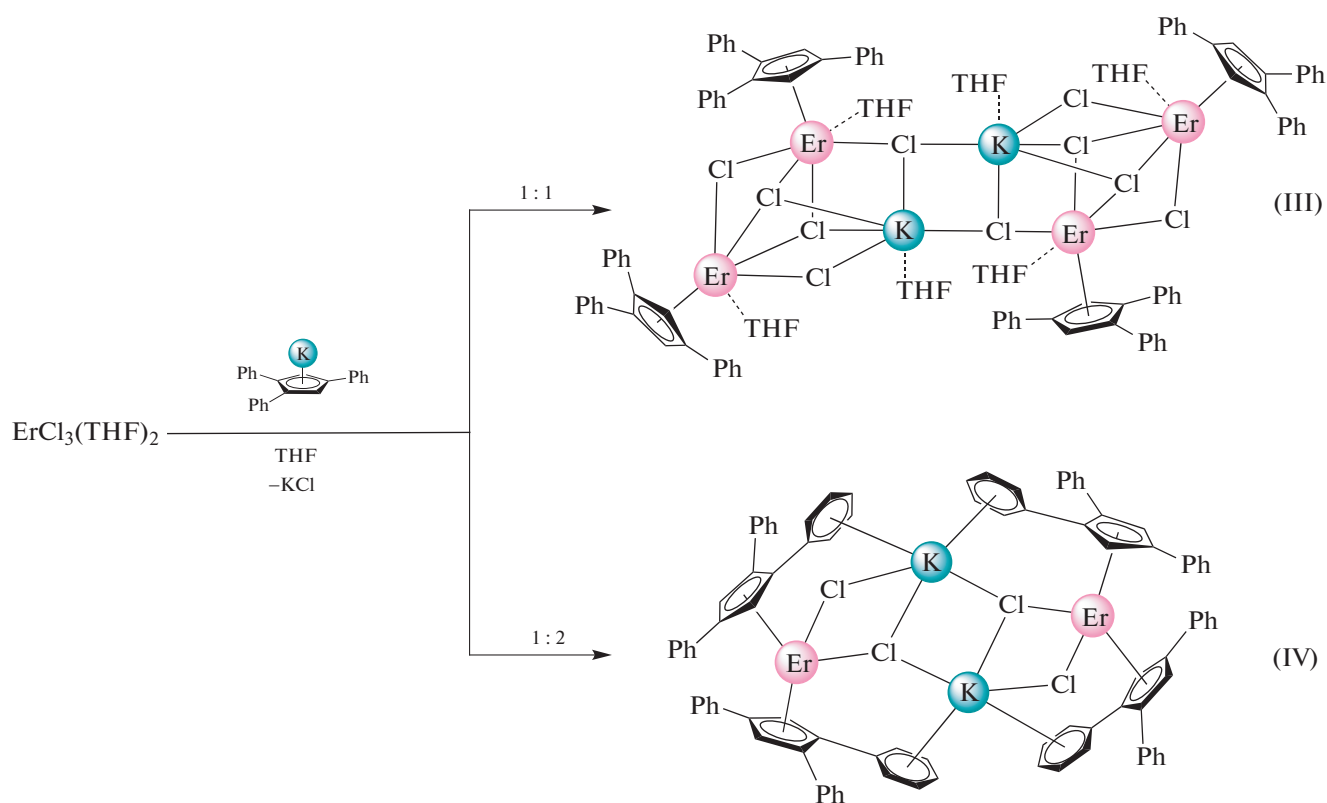


Схема 2.

Строение комплекса III также было установлено методом РСА. Комплекс III (рис. 3) сходен по строению с I. Основное отличие в строении I и III состоит в координационном окружении иона калия. В комплексе празеодима I ион калия координирован пятью хлоридными лигандами и π -системой одного из фенильных колец трифенилциклопентадиенильного лиганда, в комплексе эрбия III ион калия координирован пятью хлоридными лигандами и молекулой тетрагидрофурана. Комплекс III изоструктурен комплексам гадолиния и

тербия $[\{\text{Cp}^{\text{Ph}_3}\text{Ln}(\text{THF})\}_2(\mu_2\text{-Cl})_2(\mu_3\text{-Cl})_3\text{K}(\text{THF})_2]$ [9] ($\text{Ln} = \text{Gd}, \text{Tb}$), что в целом достаточно ожидаемо с учетом близости величин ионных радиусов Gd^{3+} , Tb^{3+} и Er^{3+} .

Строение IV (рис. 4) также установлено методом РСА рентгеноструктурного анализа, комплекс IV изоструктурен комплексу II, а также аналогичным комплексам тербия и гадолиния [20].

В результате данной работы были получены и структурно охарактеризованы моно- и бистрифен-

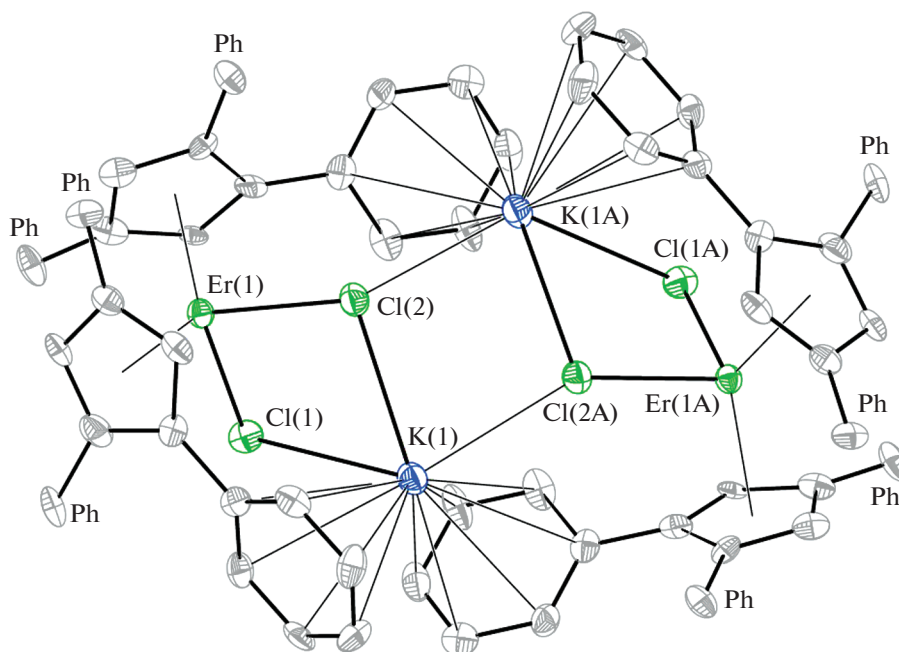


Рис. 4. Молекулярное строение комплекса IV в представлении атомов эллипсоидами тепловых колебаний ($\rho = 50\%$). Атомы водорода и часть фенильных групп не показаны для упрощения рисунка.

нилциклопентадиенилхлоридные комплексы эрбия и празеодима. Все полученные соединения представляют собой ат-комплексы. При этом моноциклопентадиенильный комплекс празеодима I изоструктурен родственному комплексу неодима, а комплекс эрбия III – комплексам тербия и гадолиния, в то время как бисциклопентадиенильные комплексы празеодима II и эрбия IV изоструктурны аналогичным бисциклопентадиенильным комплексам тербия и гадолиния.

Авторы сообщают, что у них нет конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-13-00312).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Arndt S., Okuda J. // *Chem. Rev.* 2002. V. 102. № 6. P. 1953.
2. Edelmann F.T. // *Comprehensive Organometallic Chemistry III*. Elsevier, 2007. P. 1.
3. Day B.M., Guo F.S., Layfield R.A. // *Acc. Chem. Res.* 2018. V. 51. № 8. P. 1880.
4. Evans W.J., Davis B.L. // *Chem. Rev.* 2002. V. 102. № 6. P. 2119.
5. Xu J., Gao W., Zhang Y. et al. // *J. Organomet. Chem.* 2007. V. 692. № 1. P. 1505.
6. Ye J., Deng D., Gao Y. et al. // *Spectrochim. Acta. A. Mol. Biomol. Spectrosc.* 2015. V. 134. P. 22.
7. Zhang X., Ye J., Xu L. et al. // *J. Lumin.* 2013. V. 139. P. 28.
8. Yang L., Ye J., Xu L. et al. // *RSC Adv.* 2012. V. 2. № 30. P. 11529.
9. Roitershtein D.M., Puntus L.N., Vinogradov A.A. et al. // *Inorg. Chem.* 2018. V. 57. № 16. P. 10199.
10. Minyaev M.E., Komarov P.D., Roitershtein D.M. et al. // *Organometallics.* 2019. V. 38. № 15. P. 2892.
11. Minyaev M.E., Vinogradov A.A., Roitershtein D.M. et al. // *J. Organomet. Chem.* 2016. V. 818. P. 128.
12. Edelmann F.T., Poremba P. // *Synthetic Methods of Organometallic and Inorganic Chemistry (Herrman/Brauer)* / Eds. Edelmann, F.T., Herrmann, W.A. Stuttgart (Germany): Verlag, 1997. P. 34.
13. Lochmann L., Trekoval J. // *J. Organomet. Chem.* 1987. V. 326. № 1. P. 1.
14. Hirsch S.S., Bailey W.J.J. // *Org. Chem.* 1978. V. 43. № 21. P. 4090.
15. APEX-III. Madison (WI, USA): Bruker AXS Inc., 2019.
16. Krause L., Herbst-Irmer R., Sheldrick G.M., Stalke D. // *J. Appl. Crystallogr.* 2015. V. 48. P. 3.
17. Sheldrick G.M. // *Acta Crystallogr. A.* 2015. V. 71. P. 3.
18. Sheldrick G.M. // *Acta Crystallogr. C.* 2013. V. 71. P. 3.
19. Бардонов Д.А., Лысенко К.А., Нифантьев И.Э., Ройтерштейн Д.М. // *Коорд. химия.* 2022. Т. 48. № 5. С. 296 (Bardонов D.A., Lysenko K.A., Nifant'ev I.E., Roitershtein D.M. // *Russ. J. Coord. Chem.* 2022. V. 48.

- № 5. P. 295.
<https://doi.org/10.1134/S1070328422050013>
20. *Vinogradov A.A., Komarov P.D., Puntus L.N. et al.* // *Inorg. Chim. Acta.* 2022. V. 533. № 120777.
21. *Komarov P.D., Nifant'ev I.E., Roitershtein D.M., Minyaev M.E.* // *J. Chem. Crystallogr.* 2021. V. 51. P. 352.
22. *Ройтерштейн Д.М., Миняев М.Е., Михайлюк А.А. и др.* // *Изв. АН. Сер. хим.* 2012. Т. 61. С. 1726 (*Roitershtein D.M., Minyaev M.E., Mikhaylyuk A.A. et al.* // *Russ. Chem. Bull.* 2012. V. 61. P. 1726).
23. *Fohlmeister L., Jones C.* // *J. Chem. Crystallogr.* 2014. V. 44. P. 301.