

УДК 546.650+546.02+546.05

## СИНТЕЗ, СТРОЕНИЕ И ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА $\{[\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2]_2(\mu\text{-BH}_4)_2\}$

© 2023 г. Д. А. Баширов<sup>a</sup>, Т. С. Сухих<sup>a</sup>, С. Н. Конченко<sup>a, \*</sup><sup>a</sup>Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, пр-т Академика Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090 Россия

\*e-mail: snkonch@niic.nsc.ru

Поступила в редакцию 05.05.2023 г.

После доработки 30.05.2023 г.

Принята к публикации 31.05.2023 г.

Комплекс  $\{[\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2]_2(\mu\text{-BH}_4)_2\}$  (**1**) получен реакцией  $\{[\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2]_2(\mu\text{-Cl})_2\}$  (**4**; Mes – мезитил) с избытком  $\text{NaBH}_4$  в ТГФ. Установлено, что для полного замещения хлоридных лигандов на  $\text{BH}_4^-$  необходимо нагревание реакционной смеси при  $70^\circ\text{C}$  в течение 14 сут. При прерывании реакции через 5 и 7 сут выделены поликристаллические фазы  $\{[\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2]_2(\mu\text{-BH}_4)_x(\mu\text{-Cl})_{2-x}\}$  ( $x \sim 1.2$  (**2**); 1.4 (**3**)), а также соответствующие этим составам монокристаллические образцы. Строение **1–3** установлено методом монокристаллографического РСА. Исследованы фотолюминесцентные свойства растворов комплексов в ТГФ, установлено, что замещение  $\text{Cl}^-$  на  $\text{BH}_4^-$  приводит к увеличению квантового выхода люминесценции.

**Ключевые слова:** тербий, силандиамиды, синтез, кристаллическая структура, люминесценция

DOI: 10.31857/S0044457X23601025, EDN: YFSWIF

### ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия активно развивается химия координационных соединений редкоземельных элементов (Ln) с боргидридными лигандами, что обусловлено возможностью их использования в качестве катализаторов в реакциях полимеризации циклических сложных эфиров [1]. Для этого процесса могут быть использованы *трис*-боргидридные комплексы  $[\text{Ln}(\text{BH}_4)_3(\text{thf})_x]$  [1], соединения  $[\text{LnL}_y(\text{BH}_4)_{3-y}(\text{thf})_x]$ , содержащие дополнительные анионные лиганды ( $\text{L}^-$  – циклопентадиениды [2],  $\beta$ -дикетиминаты [3–5], амидинаты [6, 7] и др. [8]), а также различные “атные” комплексы [9, 10]. Помимо применения в катализе боргидридных соединений Ln интересны как прекурсоры для синтеза других про-

изводных. Чаще всего их используют как аналоги галогенидных комплексов в реакциях ионного обмена с солями щелочных металлов различных пролигандов, а также в реакциях с акцепторами гидрид-иона ( $(\text{Et}_3\text{Si})_2(\mu\text{-H})[\text{B}(\text{C}_6\text{F}_5)_4]$  или  $[\text{Ph}_3\text{C}][\text{B}(\text{C}_6\text{F}_5)_4]$ ), приводящих к катионным комплексам  $[\text{LnL}_2][\text{B}(\text{C}_6\text{F}_5)_4]$  [11, 12].

Для синтеза гетеролигандных  $[\text{LnL}_y(\text{BH}_4)_{3-y}(\text{thf})_x]$  применяют два подхода, основанных на реакциях ионного обмена: замещение  $\text{BH}_4^-$  в  $[\text{Ln}(\text{BH}_4)_3(\text{thf})_x]$  на  $\text{L}^-$  при взаимодействии с  $\text{ML}$  ( $\text{M}$  – щелочной металл) [2, 4, 6, 7] или реакции галогенидных комплексов  $[\text{LnL}_y\text{Cl}_{3-y}(\text{thf})_x]$  с  $\text{NaBH}_4$  [3, 5] (схема 1):

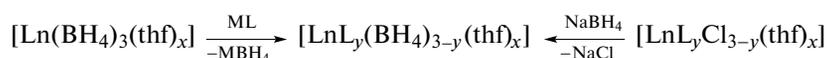


Схема 1.

Ранее нами была получена серия галогенидных соединений Ln с силандиамидными лигандами состава  $\{[\text{Ln}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NAryl})_2)(\text{thf})_2]_2(\mu\text{-Cl})_2\}$  (Aryl = Dipp (2,6-диизопропилфенил), Ln = Y, Gd, Tb, Sm; Aryl = Mes (мезитил), Ln = Y, Gd, Tb) [13].

Несмотря на то, что комплексы Ln с силандиамидами известны с 1999 г. [14], их химия на сегодняшний день представлена небольшим количеством работ [13–23] и остается малоизученной, а координационные соединения Ln, содержащие

одновременно силандиамидный лиганд и  $\text{BH}_4^-$ , до настоящего времени не были получены.

В настоящей работе исследована реакция  $\{[\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2]_2(\mu\text{-Cl})_2\}$  с  $\text{NaBH}_4$ , в результате которой происходит постепенное замещение  $\text{Cl}^-$  на  $\text{BH}_4^-$ , полнота которого достигается через ~14 сут. Строение финального продукта – комплекса  $\{[\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2]_2(\mu\text{-BH}_4)_2\}$  (**1**), а также соединений промежуточного состава  $\{[\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2]_2(\mu\text{-BH}_4)_x(\mu\text{-Cl})_{2-x}\}$  ( $x = 1.2$  (**2**),  $1.4$  (**3**)) установлено с помощью монокристалльного РСА. Исследование фотолуминесцентных свойств растворов комплексов **1–4** в ТГФ показало, что наблюдается тенденция увеличения квантового выхода эмиссии с ростом содержания  $\text{BH}_4^-$ .

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Все манипуляции с чувствительными к воздуху и влаге веществами проводили в атмосфере очищенного аргона или в вакууме с использованием сосудов Шленка, ампул или в перчаточном боксе. Загрузку веществ, растворителей и центрифугирование растворов осуществляли в аргоновом перчаточном боксе. Растворители подвергали обезвоживанию и дегазации кипячением и перегонкой в атмосфере инертного газа с помощью соответствующих осушителей [24].  $\text{NaBH}_4$  использовали в коммерчески доступном виде, синтез  $\{[\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2]_2(\mu\text{-Cl})_2\}$  [13] проводили по известной методике. ИК-спектры снимали на спектрометре FT-801 (Simex) в таблетках  $\text{KBr}$ , спрессованных в перчаточном боксе и хранившихся до измерений в атмосфере аргона. Электронные спектры поглощения записывали с помощью спектрометра Cary 60 UV-Vis (Agilent), снабженного ксеноновой импульсной лампой (80 Гц) в качестве источника возбуждения. Спектры регистрировали для разбавленных растворов в ТГФ со средней концентрацией  $\sim 10^{-4}$  моль/л в кварцевых кюветах ( $l = 1$  см и  $1$  мм). Спектры излучения и возбуждения для тех же растворов записывали с помощью спектрометра Cary Eclipse (Agilent) в кварцевых кюветах  $1$  см. Кюветы закрывали в инертной атмосфере навинчивающимися крышками с силиконовой прокладкой или пробками, смазанными тефлоновой смазкой. Соотношение относительных квантовых выходов оценивали по формуле:  $Q_1/Q_2 = S_1D_2/(S_2D_1)$ , где  $Q$  – квантовый выход,  $S$  – суммарная площадь пиков эмиссии,  $D$  – оптическая плотность на длине волны возбуждения ( $\lambda = 300$  нм) соответствующего образца. Анализ образцов на C, H, N, S проводили на анализаторе vario MICRO cube. Энергодисперсионный анализ (ЭДС) выполняли на электронном микроскопе Hitachi TM-3000, оснащенный анали-

затором Bruker Nano EDS. Рентгенодифракционные данные для кристаллов **1–3** получены при  $150$  К на дифрактометре Bruker D8 Venture ( $0.5^\circ \omega$ - и  $\phi$ -сканирование, трехкружный гониометр с фиксированным  $\chi$ , КМОП-детектор PHOTON III, Mo- $\mu\text{S}$  3.0 микрофокусный источник, фокусировка с помощью зеркал Монтеля,  $\text{MoK}_\alpha$  с  $\lambda = 0.71073$  Å, азотный термостат). Кристаллические структуры были решены с помощью ShelXT [25] и уточнены с использованием программ ShelXL [26] с графическим интерфейсом Olex2 [27]. Атомные смещения для неводородных атомов уточнены в гармоническом анизотропном приближении. Для разупорядоченных атомов В и Cl, занимающих близкие позиции, были введены ограничения на равенство параметров атомного смещения (EADP). Атомы водорода расположены геометрически, за исключением  $\text{BH}_4^-$ , в котором они были локализованы из карты остаточной электронной плотности и уточнялись свободно с ограничениями на длины связи В–Н (DFIX 1.1). Атомные смещения для всех атомов Н уточняли в модели “наездника”. Структуры депонированы в Кембриджском банке структурных данных под номерами 2260128–2260130.

**Синтез  $\{[\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2]_2(\mu\text{-BH}_4)_2\}$  (**1**).** Смесь твердых  $\{[\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2]_2(\mu\text{-Cl})_2\}$  ( $0.100$  г,  $0.075$  ммоль) и  $\text{NaBH}_4$  ( $0.010$  г,  $0.264$  ммоль) помещали в сосуд Шленка, снабженный тефлоновым краном (J. Young), и добавляли  $6$  мл ТГФ, после чего сосуд Шленка с реакционной смесью охлаждали до температуры жидкого азота и вакуумировали до остаточного давления  $10^{-3}$  мм рт. ст. После нагревания до комнатной температуры смесь в течение  $14$  сут нагревали при  $70^\circ\text{C}$  (температура масляной бани). Образовавшийся хлорид натрия отделяли центрифугированием, к раствору добавляли  $4$  мл толуола. Медленное концентрирование раствора в  $\sim 10$  раз приводило к образованию бесцветных кристаллов **1**. После декантирования раствора и высушивания кристаллов в вакууме общая масса составила  $0.070$  г ( $72\%$ ).

	C	H	N
Найдено, %:	51.9;	7.7;	4.2.
Для $\text{C}_{56}\text{H}_{96}\text{B}_2\text{N}_4\text{O}_4\text{Si}_2\text{Tb}_2$			
вычислено, %:	52.3;	7.5;	4.4.

При прерывании реакции через  $5$  и  $7$  сут после обработки реакционной смеси по аналогичной схеме были выделены поликристаллические фазы  $\{[\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2]_2(\mu\text{-BH}_4)_{1.2}(\mu\text{-Cl})_{0.8}\}$  (**2**) и  $\{[\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2]_2(\mu\text{-BH}_4)_{1.4}(\mu\text{-Cl})_{0.6}\}$  (**3**) соответственно. Монокристаллические образцы были обнаружены в кристаллических массах.

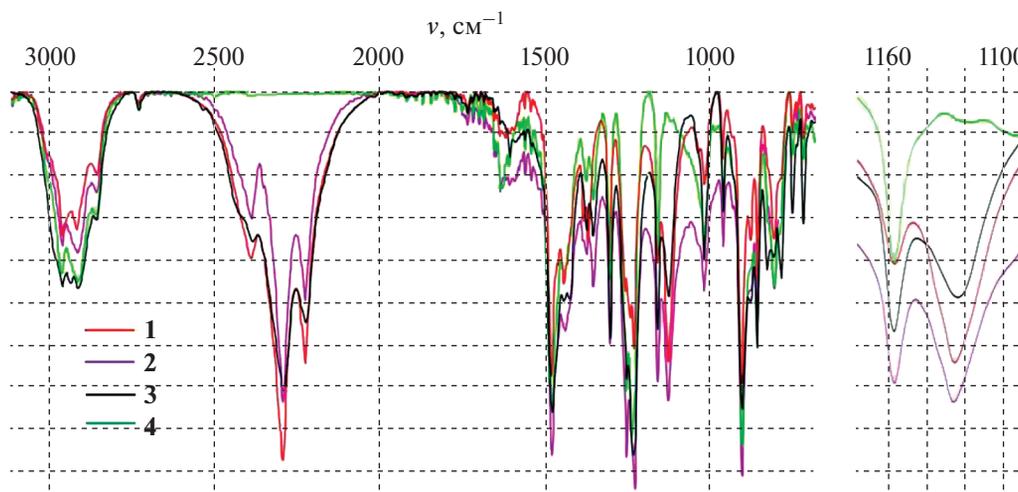


Рис. 1. ИК-спектры соединений 1–4.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наличие хлоридного лиганда позволяет рассматривать комплекс  $[\{\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2\}_2(\mu\text{-Cl})_2]$  (**4**) как подходящий реагент для получения различных гетеролигандных комплексов путем замещения  $\text{Cl}^-$  на другие анионные лиганды. В данной работе с целью разработки методики синтеза боргидридного комплекса  $[\{\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2\}_2(\mu\text{-BH}_4)_2]$  (**1**) нами исследована реакция **4** с избытком  $\text{NaBH}_4$ . Для этого выполнено несколько экспериментов, в которых реакцию смесь нагревали в ТГФ при  $70^\circ\text{C}$  в течение длительного времени. Прерывание реакции через 5, 7 и 14 сут с последующей обработкой реакционных смесей, как описано в экспериментальной части, приводит к выделению кристаллических фаз, которые, по данным ЭДС, содержат тяжелые элементы Cl, Si и Tb в следующих соотношениях: 0.4 : 1 : 1 (**2**) через 5 сут, (0.3 : 1 : 1) (**3**) через 7 сут и (0 : 1 : 1) (**1**) через 14 сут. Таким образом, продукт полного замещения хлора гарантированно может быть получен нагреванием реакционной смеси в течение 14 сут. Прерывание реакции в течение первой недели приводит к соединениям, содержащим как  $\text{Cl}^-$ , так и  $\text{BH}_4^-$ , причем наблюдается постепенное уменьшение хлора со временем. Изменение степени замещения хлорида на боргидрид можно проследить по изменению ИК-спектров: в ряду **3**–**2**–**1** наблюдается увеличение интенсивности полос валентных колебаний B–N ( $2100\text{--}2500\text{ cm}^{-1}$ ) по сравнению с интенсивностью валентных колебаний C–N ( $2800\text{--}3100\text{ cm}^{-1}$ ) силандиамидного лиганда, а также синхронное увеличение интенсивности деформационных колебаний B–N ( $\sim 1130\text{ cm}^{-1}$ ) по сравнению с C–N ( $\sim 1150\text{ cm}^{-1}$ ) (рис. 1).

Монокристаллические образцы были получены как для финального соединения **1**, так и для фаз **2** и **3**. По данным РСА (табл. 1), все три соединения изоструктурны исходному галогенидному комплексу **4** (кристаллографические параметры **4**:  $Pbca$ ,  $a = 17.3121(4)$ ,  $b = 15.9196(4)$ ,  $c = 21.8917(5)$  Å,  $V = 6033.4(2)$  Å<sup>3</sup>,  $Z = 4$  [13]). В структуре  $[\{\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2\}_2(\mu\text{-BH}_4)_{1.2}(\mu\text{-Cl})_{0.8}]$  (**2**) и  $[\{\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2\}_2(\mu\text{-BH}_4)_{1.4}(\mu\text{-Cl})_{0.6}]$  (**3**) лиганды  $\text{BH}_4^-$  и  $\text{Cl}^-$  разупорядочены, они занимают близкие позиции. Строение молекулы комплекса **1** (рис. 2а) подобно строению **4** [13]. К ионам Tb хелатно координированы силандиамиды, в координационную сферу входят также два мостиковых боргидридных лиганда, расположенных аналогично  $\text{Cl}^-$  в исходном комплексе **4** (рис. 2б), и две молекулы ТГФ.  $\text{BH}_4^-$  координируется двумя атомами Н к одному из ионов Tb и одним атомом Н ко второму. Вследствие подобного строения молекул хлоридного и боргидридного комплексов возможно образование твердых растворов на их основе, что и демонстрируют промежуточные фазы **2** и **3**, в которых  $\text{BH}_4^-$  и  $\text{Cl}^-$  расположены в одинаковых позициях с соотношением 0.6 : 0.4 и 0.7 : 0.3 соответственно. Длины связей в молекулах **1**–**4** близки друг к другу (табл. 2), но из-за большего размера ионов  $\text{BH}_4^-$  по сравнению с  $\text{Cl}^-$  в ряду **4**, **2**, **3**, **1** наблюдается увеличение расстояний Tb...Tb. Расстояния Tb...B не коррелируют с содержанием бора, по-видимому, из-за недостаточно точной локализации атомов B в соединениях **2** и **3** вследствие влияния более тяжелого атома хлора.

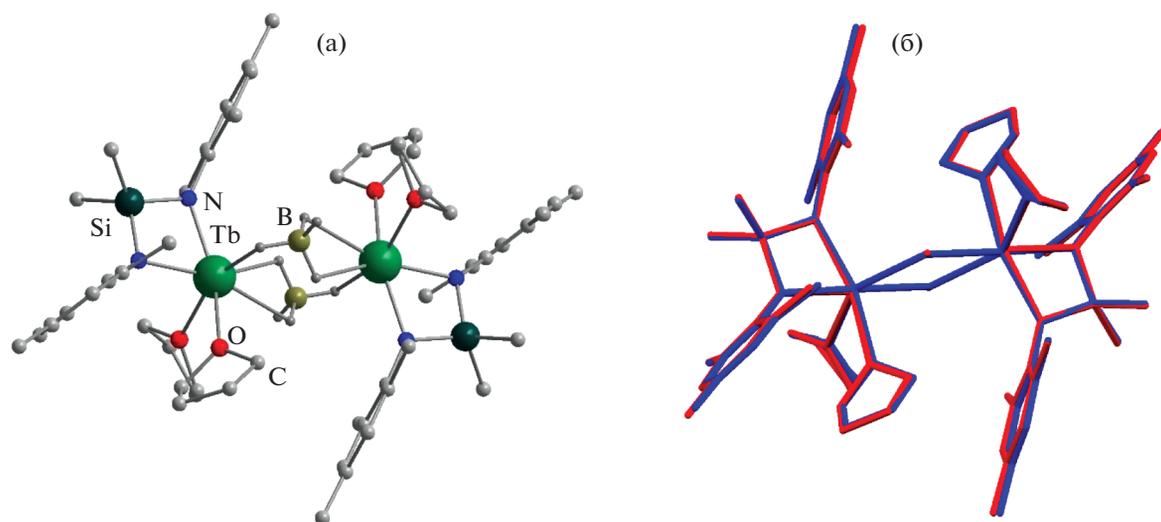
Ранее нами были изучены фотолюминесцентные свойства комплексов Ln с силандиамидными лигандами  $(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NAr})_2)^{2-}$  (Aryl = Dipp (2,6-ди-

**Таблица 1.** Кристаллографические характеристики, детали эксперимента и уточнения структур

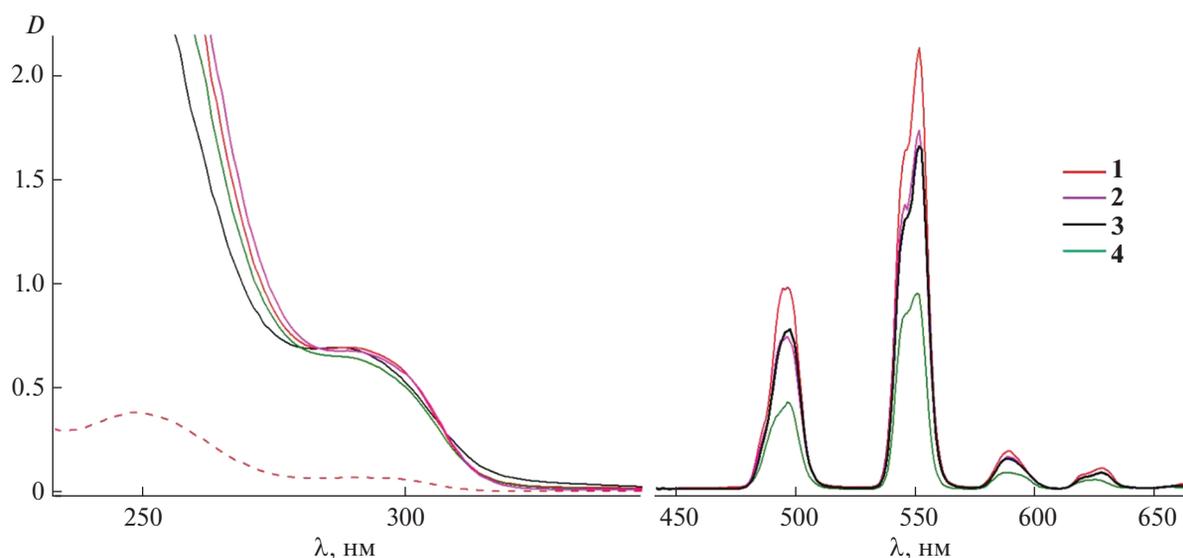
Параметр	1	2	3
Брутто-формула	$C_{56}H_{96}B_2N_4O_4Si_2Tb_2$	$C_{56}H_{92.9}B_{1.2}Cl_{0.8}N_4O_4Si_2Tb_2$	$C_{56}H_{93.6}B_{1.4}Cl_{0.6}N_4O_4Si_2Tb_2$
<i>M</i>	1285.00	1300.97	1297.36
Пр. гр.	<i>Pbca</i>	<i>Pbca</i>	<i>Pbca</i>
<i>a</i> , Å	17.4679(5)	17.4543(4)	17.4543(4)
<i>b</i> , Å	16.0018(4)	15.9872(3)	15.9872(3)
<i>c</i> , Å	21.8088(6)	21.8043(5)	21.8043(5)
<i>V</i> , Å <sup>3</sup>	6095.9(3)	6084.4(2)	6084.4(2)
<i>Z</i>	4	4	4
$\rho_{\text{выч}}$ , г/см <sup>3</sup>	1.400	1.420	1.416
$\mu$ , мм <sup>-1</sup>	2.385	2.424	2.416
<i>F</i> (000)	2640.0	2665.0	2659.0
Диапазон сбора данных по 2 $\theta$ , град	4.664–57.396	5.09–61.036	4.668–55.776
Диапазоны <i>h</i> , <i>k</i> , <i>l</i>	$-21 \leq h \leq 23$ , $-21 \leq k \leq 21$ , $-28 \leq l \leq 29$	$-24 \leq h \leq 23$ , $-22 \leq k \leq 22$ , $-31 \leq l \leq 31$	$-21 \leq h \leq 22$ , $-20 \leq k \leq 21$ , $-28 \leq l \leq 28$
Число измеренных рефлексов	76700	91301	73587
Число независимых рефлексов [ <i>R</i> <sub>int</sub> , <i>R</i> <sub>sigma</sub> ]	7877 [0.0452, 0.0229]	9273 [0.0451, 0.0246]	7254 [0.0355, 0.0178]
Число ограничений/уточняемых параметров	4/336	4/340	4/340
GOOF по <i>F</i> <sup>2</sup>	1.005	1.022	1.027
<i>R</i> -фактор ( <i>I</i> > 2 $\sigma$ ( <i>I</i> ))	<i>R</i> <sub>1</sub> = 0.0228, <i>wR</i> <sub>2</sub> = 0.0464	<i>R</i> <sub>1</sub> = 0.0237, <i>wR</i> <sub>2</sub> = 0.0461	<i>R</i> <sub>1</sub> = 0.0202, <i>wR</i> <sub>2</sub> = 0.0430
<i>R</i> -фактор (все данные)	<i>R</i> <sub>1</sub> = 0.0415, <i>wR</i> <sub>2</sub> = 0.0519	<i>R</i> <sub>1</sub> = 0.0441, <i>wR</i> <sub>2</sub> = 0.0512	<i>R</i> <sub>1</sub> = 0.0315, <i>wR</i> <sub>2</sub> = 0.0472
$\Delta\rho_{\text{max}}/\Delta\rho_{\text{min}}$ , e Å <sup>-3</sup>	0.49/–0.43	0.38/–0.49	0.45/–0.39

**Таблица 2.** Некоторые расстояния, длины связи (Å) и углы (град) в комплексах

Связь, угол	1	2	3	4 [13]
Tb–Cl	–	2.82 2.74	2.80 2.75	2.80 2.71
Tb–O	2.43 2.43	2.42 2.43	2.43 2.43	2.42 2.43
Tb–N	2.24 2.24	2.24 2.25	2.24 2.24	2.24 2.24
Tb...B	2.85 2.86	2.83 2.78	2.89 2.78	–
Tb...Tb	4.39	4.32	4.34	4.26
Si–N	1.72 1.73	1.72 1.73	1.72 1.73	1.72 1.73
N2Tb1N1	70.35	70.24	70.24	70.06
N2Si1N1	96.66	96.77	96.64	96.79



**Рис. 2.** Структура  $[\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2]_2(\mu\text{-BH}_4)_2$  (**1**), атомы водорода показаны только для фрагмента  $\text{BH}_4^-$  (а); сравнение строения  $[\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2]_2(\mu\text{-Cl})_2$  (синий) и  $[\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2]_2(\mu\text{-BH}_4)_2$  (красный) (б).



**Рис. 3.** Спектры поглощения растворов соединений **1–4** в ТГФ ( $C \sim 10^{-4}$  моль/л) в кюветках 1 см (сплошные линии) и 1 мм (прерывистая линия, приведен только для **1**) (а); спектры фотолюминесценции растворов соединений **1–4** в ТГФ ( $C \sim 10^{-4}$  моль/л) (б).

зопропилфенил), Mes [13], pbt (2-фенилбензотиазол) [22]) и показано, что силандиамиды с заместителями Dipp и Mes выступают в качестве “антенны” для сенсibilизации люминесценции Tb(III), а комплекс **4** проявляет металл-центрированную эмиссию в твердом виде и в растворе [13]. В настоящей работе были записаны электронные спектры поглощения (рис. 3а) и спектры фотолюминесценции (рис. 3б) для растворов **1–4** в ТГФ ( $C \sim 10^{-4}$  моль/л). Спектры поглощения соединений **1–3** практически идентичны и совпадают со

спектром **4** [13]. В них наблюдаются полосы при 250 и 290 нм, соответствующие электронным переходам внутри силандиамидного лиганда  $(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)^{2-}$ . Сравнение спектров фотолюминесценции **1–3** со спектром исходного хлоридного комплекса (рис. 3б) показывает, что замещение  $\text{Cl}^-$  на  $\text{BH}_4^-$  приводит к увеличению интенсивности эмиссии и относительного квантового выхода в растворе, а при полном замещении  $\text{Cl}^-$  квантовый выход люминесценции увеличивается в два раза по сравнению с **4**.

Таким образом, установлено, что комплекс  $[\{\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2\}_2(\mu\text{-BH}_4)_2]$  (**1**) может быть получен с выходом 72% обработкой  $[\{\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2\}_2(\mu\text{-Cl})_2]$  (**4**) избытком  $\text{NaBH}_4$  в ТГФ при  $70^\circ\text{C}$  в течение 14 сут. Более раннее прерывание реакции не дает гарантии полного замещения хлорид-ионов. Так, завершение синтеза на первой неделе позволяет выделить только смешанные хлоридно-боргидридные соединения  $[\{\text{Tb}(\text{Me}_2\text{Si}(\text{NMes})_2)(\text{thf})_2\}_2(\mu\text{-BH}_4)_x(\mu\text{-Cl})_{2-x}]$ . Все выделяемые по мере протекания реакции соединения изоструктурны исходному комплексу **4**. Мониторинг степени прохождения реакции возможен с помощью ИК-спектроскопии. В спектрах люминесценции растворов комплексов в ТГФ наблюдается увеличение квантового выхода эмиссии при увеличении доли  $\text{BH}_4^-$  в координационной сфере Tb(III).

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 21-13-00287). Авторы благодарят Министерство науки и высшего образования РФ (121031700321-3, 121031700313-8).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lyubov D.M., Tolpygin A.O., Trifonov A.A. // *Coord. Chem. Rev.* 2019. V. 392. P. 83.
2. Palard I., Soum A., Guillaume S.M. // *Chem. Eur. J.* 2004. V. 10. P. 4054.
3. Zhu L., Xu Y., Yuan D. et al. // *J. Organomet. Chem.* 2021. V. 934. P. 121662.
4. Schmid M., Guillaume S.M., Roesky P.W. // *Organometallics*. 2014. V. 33. P. 5392.
5. Shen X., Xue M., Jiao R. et al. // *Organometallics*. 2012. V. 31. P. 6222.
6. Seifert T.P., Brunner T.S., Fischer T.S. et al. // *Organometallics*. 2018. V. 37. P. 4481.
7. Skvortsov G.G., Shavyrin A.S., Kovylyina T.A. et al. // *Eur. J. Inorg. Chem.* 2019. P. 5008.
8. Fadlallah S., Jothieswaran J., Capet F. et al. // *Chem. Eur. J.* 2017. V. 23. P. 15644.
9. Скворцов Г.Г., Яковенко М.В., Фукин Г.К. и др. // *Изв. АН. Сер. хим.* Т. 56. № 9. С. 1680.
10. Skvortsov G.G., Yakovenko M.V., Castro P.M. et al. // *Eur. J. Inorg. Chem.* 2007. P. 3260.
11. Guo F.-Sh., Day B.M., Chen Y.-C. et al. // *Science*. 2018. V. 362. P. 1400.
12. Goodwin C.A.P., Reta D., Ortu F. et al. // *Chem. Commun.* 2018. V. 54. P. 9182.
13. Mironova O.A., Lashchenko D.I., Ryadun A.A. et al. // *New J. Chem.* 2022. V. 46. P. 2351.
14. Wang Sh., Yang Q., Mak T.C.W., Xie Z. // *Organometallics*. 1999. V. 18. P. 5511.
15. Zhu X., Guo D., Zhang Y. et al. // *Organometallics*. 2020. V. 39. P. 4584.
16. Zhu X., Fan J., Wu Y. et al. // *Organometallics*. 2009. V. 28. P. 3882.
17. Pan C.L., Pan Y.S., Wang J., Song J.F. // *Dalton Trans.* 2011. V. 40. P. 6361.
18. Pan C.L., Chen W., Song J.-F. // *Organometallics*. 2011. V. 30. P. 2252.
19. Pan C.L., Sheng S.D., Hou C.M. et al. // *Eur. J. Inorg. Chem.* 2012. P. 779.
20. Zhou L., Yao Y., Li Ch. et al. // *Organometallics*. 2006. V. 25. P. 2880.
21. Lu Ch.-R., Zhao B., Zhou L.-Y. et al. // *Chin. J. Chem.* 2007. V. 25. P. 670.
22. Mironova O.A., Ryadun A.A., Sukhikh T.S. et al. // *New J. Chem.* 2023. V. 47. P. 3406.
23. Баширов Д.А., Лащенко Д.И., Сухих Т.С., Конченко С.Н. // *Журн. структур. химии*. 2022. Т. 63. № 12. С. 103654.
24. Гордон А., Форд Р. Спутник химика. М., 1976. 541 с. Gordon A.J., Ford R.A. *The Chemist's Companion: a Handbook of Practical Data, Techniques and References*, New York, 1976.
25. Sheldrick G.M. // *Acta Crystallogr., Sect. A*. 2015. V. 71. P. 3.
26. Sheldrick G.M. // *Acta Crystallogr., Sect. C*. 2015. V. 71. P. 3.
27. Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al. // *J. Appl. Crystallogr.* 2009. V. 42. P. 339.