

УДК 546.650:547.794.3:548.73:54.052:543.426

## КОМПЛЕКСЫ Sm, Eu И Gd С 4-(2,1,3-БЕНЗОТИАДИАЗОЛ-4-ИЛАМИНО)-ПЕНТ-3-ЕН-2-ОНАТОМ

© 2019 г. Т. С. Сухих<sup>1,2,\*</sup>, Д. С. Огиенко<sup>1</sup>, Д. А. Баширов<sup>1,2</sup>, Н. В. Куратьева<sup>1,2</sup>,  
А. И. Смоленцев<sup>1</sup>, С. Н. Конченко<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

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

Поступила в редакцию 04.04.2018 г.

После доработки 24.05.2018 г.

Принята к публикации 15.06.2018 г.

Новые комплексы лантанидов с 4-(2,1,3-бензотиадиазол-4-иламино)-пент-3-ен-2-онатом ( $L^-$ )  $[Ln(L)_3]$  получены двумя способами: взаимодействием  $Ln(N(SiMe_3)_2)_3$  с протонированной формой лиганда LH ( $Ln = Sm, Gd$ ) и реакцией  $LnCl_3$  ( $Ln = Eu$ ) с LH в присутствии основания  $KN(SiMe_3)_2$ . По данным PCA, полученные комплексы  $[Ln(L)_3] \cdot 0.5Solv$  ( $Solv = TGF, C_7H_8$ ) изотипны (CIF files CCDC № 1826520, 1826521, 1826522 для Sm, Eu, Gd соответственно). Особенностью структур является разупорядочение атома металла и одного из лигандов по двум позициям, при котором фрагменты лигандов в молекуле комплексов располагаются “голова” к “хвосту”, занимая одинаковый объем пространства, что с некоторой вероятностью приводит к сбою в кристаллической упаковке. Записаны спектры фотолюминесценции  $[Sm(L)_3] \cdot 0.5TGF$ , выявлена корреляция способа координации лиганда и положения длинноволновой полосы электронных переходов в комплексах с лигандом  $L^-$ .

**Ключевые слова:** комплексные соединения, лантаниды, гетероциклические лиганды, кристаллическая структура, фотолюминесценция

**DOI:** 10.1134/S0132344X19010110

2,1,3-Бензотиадиазол (**Btd**) и его производные – объекты, представляющие интерес как предшественники и/или составные части материалов для органических светодиодов (OLED) и другой оптоэлектроники: телекоммуникационных систем, сенсоров, преобразователей солнечной энергии и др. [1, 2]. Среди этих объектов в настоящее время наибольшее внимание уделяется органическим полимерам на основе Btd, обладающие рядом важных свойств, необходимых для создания люминесцентных функциональных материалов: 1) проявляют электроноакцепторные свойства и могут выступать в качестве буфера электронов [3–6]; 2) являются эффективными флуорофорами [7–10]; 3) формируют в твердом состоянии супрамолекулярные структуры вследствие образования сероазотных контактов и  $\pi$ – $\pi$ -взаимодействий в сопряженных системах [11]. Наряду с сопряженными полимерными системами интерес представляют координационные молекулярные комплексы и координационные полимеры *d*- и *f*-элементов с функционализированными производными Btd. Они позволяют устранить некоторые недостатки органических полимеров, например повысить стабильность работы светоизлучающих диодов за счет более высо-

кой термической, химической и фотохимической устойчивости, а также снять ограничение на квантовую эффективность.

Ранее на примере некоторых комплексов с лигандами-производными Btd было показано, что они обладают нетривиальными люминесцентными свойствами [12–17]. Однако соединения как *d*-, так и *f*-металлов с производными Btd в качестве лигандов все еще изучены мало, поэтому их синтез, выявление способов координации и исследование свойств, в первую очередь люминесцентных, является актуальной задачей.

Недавно мы синтезировали комплексы Zn, Ag и Cd с 4-амино-2,1,3-бензотиадиазолом [18–21] и лантанидов с 4-окси-2,1,3-бензотиадиазолатом  $(O-Btd)^-$  [22, 23], обладающие интересными фотофизическими свойствами. Например, установлено, что  $(O-Btd)^-$  проявляет свойства лиганда-антенны в комплексах Eg и Yb: они обладают интенсивной люминесценцией в ИК-диапазоне [22, 23]. Кроме того, мы получили новый представитель класса функционализированных бензотиадиазолов – 4-(2,1,3-бензотиадиазол-4-иламино)-пент-3-ен-2-он (**LH**,

схема 1), обладающий интенсивной эмиссией и высоким квантовым выходом [18]. Легко депротонируемая кетоиминная группа делает LH перспективным хелатирующим лигандом по отношению к *d*- и *f*-металлам. Так, ранее мы

сообщали о синтезе и изучении строения и свойств комплекса  $[Zn(L)_2]$  [18].

Настоящая работа направлена на развитие координационной химии этого лиганда – разработку методов синтеза и PCA комплексов самария, европия и гадолиния с  $L^-$ .

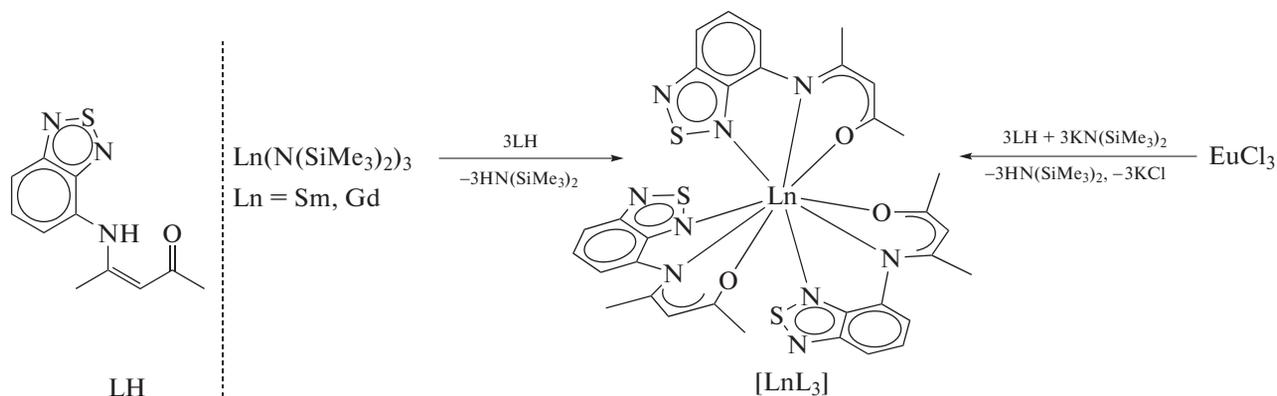


Схема 1.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Коммерчески доступные безводные  $\text{LnCl}_3$  ( $\text{Ln} = \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}$ ) использовали без дополнительной очистки. Амиды лантанидов  $\text{Ln}(\text{N}(\text{SiMe}_3)_2)_3$  ( $\text{Ln} = \text{Sm}, \text{Gd}$ ) [24] и кетоимин LH [18] синтезировали по известным методикам. Растворители осушали кипячением и перегонкой над натрием в атмосфере аргона, после чего дегазировали многократным вакуумированием и хранили над калий-натриевым сплавом, откуда их загружали в реакционный сосуд путем конденсации в вакууме. Синтез и выделение комплексов проводили в вакуумированных сосудах без использования инертного газа. Образцы для физико-химических анализов готовили в аргонном перчаточном боксе для предотвращения их гидролиза. Элементный анализ образцов на C, H, N, S проводили на приборе Euro EA 3000. Несколько завышенное содержание углерода и водорода в комплексе  $[\text{Gd}(\text{L})_3] \cdot 0.5\text{C}_7\text{H}_8$  связано, по-видимому, с неполным удалением растворителя из твердого образца. Спектры люминесценции твердых образцов записывали на флуоресцентном спектрофотометре Horiba Jobin Yvon Fluorolog 3 при 298 К, щель  $5 \times 5$  нм, длина волны возбуждения 380 нм для LH и 450 нм для  $[\text{Sm}(\text{L})_3] \cdot 0.5\text{TГФ}$ . Коррекцию интенсивности источника излучения и спектрального отклика проводили с помощью стандартных корректировочных кривых. Спектры твердых веществ записывали для порошкообразных образцов, помещенных между двумя нефлуоресцентными кварцевыми стеклами.

PCA соединений  $[\text{Ln}(\text{L})_3] \cdot 0.5\text{Solv}$  был выполнен на дифрактометре Bruker APEX DUO (излучение

$\text{MoK}_\alpha$ ,  $\lambda = 0.71073 \text{ \AA}$ , графитовый монохроматор) при 150 К. Интенсивности отражений измерены методом  $\phi$ - и  $\omega$ -сканирования узких ( $0.5^\circ$ ) фреймов. Поглощение учтено по программе SADABS [25]. Структуры расшифрованы прямым методом и уточнены полноматричным МНК в анизотропном для неводородных атомов приближении по комплексу программ SHELXTL [26, 27] и графическому интерфейсу OLEX2 [28].

Атомы H локализованы геометрически и уточнены по модели “наездника”. Атомы Ln и один лиганд разупорядочены по двум позициям с общей уточняемой заселенностью от 92/8 до 84/16%. Атомы C, N, O фрагментов с меньшей заселенностью уточнены в изотропном приближении с ограничениями на некоторые длины связей DFIX, угловые расстояния DANG и отклонения атомов от плоскости кольца  $\text{C}_6$  FLAT. Для атомов сольватных молекул ТГФ и толуола, лежащих рядом с центром инверсии, было учтено разупорядочение по двум позициям с фиксированной заселенностью 50/50%. Фенильное кольцо толуола уточнено как жесткий фрагмент; на длину связи C–CH<sub>3</sub> наложено ограничение DFIX. На длины связей и угловые расстояния молекул ТГФ также наложены соответствующие ограничения. Кристаллографические данные приведены в табл. 1.

Данные PCA для структур  $[\text{Ln}(\text{L})_3] \cdot 0.5\text{Solv}$  ( $\text{Ln} = \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}$ ) депонированы в Кембриджском банке структурных данных (CCDC № 1826520–1826522; deposit@ccdc.cam.ac.uk или [http://www.ccdc.cam.ac.uk/data\\_request/cif](http://www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif)) и могут быть получены у авторов.

**Таблица 1.** Кристаллографические данные и результаты уточнения структур комплексов  $[\text{Ln}(\text{L})_3] \cdot 0.5\text{Solv}$ 

Параметр	Значение		
	$\text{C}_{35}\text{H}_{34}\text{N}_9\text{O}_{3.5}\text{S}_3\text{Sm}$	$\text{C}_{35}\text{H}_{34}\text{N}_9\text{O}_{3.5}\text{S}_3\text{Eu}$	$\text{C}_{36.5}\text{H}_{34}\text{N}_9\text{O}_3\text{S}_3\text{Gd}$
Брутто-формула	$\text{C}_{35}\text{H}_{34}\text{N}_9\text{O}_{3.5}\text{S}_3\text{Sm}$	$\text{C}_{35}\text{H}_{34}\text{N}_9\text{O}_{3.5}\text{S}_3\text{Eu}$	$\text{C}_{36.5}\text{H}_{34}\text{N}_9\text{O}_3\text{S}_3\text{Gd}$
$M$	883.24	884.85	900.16
Сингония	Моноклинная	Моноклинная	Моноклинная
Пр. гр.	$P2_1/c$	$P2_1/c$	$P2_1/c$
$a, \text{Å}$	15.2112(5)	15.2112(5)	15.2112(5)
$b, \text{Å}$	14.7836(5)	14.7836(5)	14.7836(5)
$c, \text{Å}$	19.0856(5)	19.0856(5)	19.0856(5)
$\beta$ , град	121.666(2)	121.666(2)	121.666(2)
$V, \text{Å}^3$	3652.9(2)	3652.9(2)	3652.9(2)
$Z$	4	4	4
$\rho$ (выч.), $\text{г}/\text{см}^3$	1.606	1.609	1.637
$\mu$ , $\text{мм}^{-1}$	1.830	1.939	2.038
$F(000)$	1780.0	1784.0	1808.0
Размер кристалла, мм	$0.35 \times 0.23 \times 0.10$	$0.30 \times 0.12 \times 0.08$	$0.20 \times 0.10 \times 0.08$
Диапазон сбора данных по $2\theta$ , град	3.726–57.398	3.146–51.364	3.146–51.364
Диапазоны $h, k, l$	$-20 \leq h \leq 20,$ $-19 \leq k \leq 19,$ $-22 \leq l \leq 25$	$-18 \leq h \leq 18,$ $-18 \leq k \leq 17,$ $-23 \leq l \leq 20$	$-18 \leq h \leq 18,$ $-17 \leq k \leq 18,$ $-23 \leq l \leq 23$
Число измеренных рефлексов	36586	25645	36976
Число независимых рефлексов ( $R_{\text{int}}$ )	9424 (0.0246)	6938 (0.0226)	6936 (0.0404)
$R_{\sigma}$	0.0203	0.0194	0.0313
Число уточняемых параметров	536	536	572
Число ограничений	24	27	18
GOOF по $F^2$	1.383	1.215	1.036
$R$ -фактор ( $I > 2\sigma(I)$ )	$R_1 = 0.0469,$ $wR_2 = 0.1042$	$R_1 = 0.0294,$ $wR_2 = 0.0617$	$R_1 = 0.0270,$ $wR_2 = 0.0550$
$R$ -фактор (все данные)	$R_1 = 0.0484,$ $wR_2 = 0.1046$	$R_1 = 0.0315,$ $wR_2 = 0.0624$	$R_1 = 0.0360,$ $wR_2 = 0.0572$
$\Delta\rho_{\text{max}}/\Delta\rho_{\text{min}}, e \text{ Å}^{-3}$	1.59/–1.13	0.94/–0.63	0.70/–0.40

**Синтез  $[\text{Sm}(\text{L})_3] \cdot 0.5\text{TГФ}$ .** На смесь твердых LH (0.045 г, 0.193 ммоль) и  $\text{Sm}(\text{N}(\text{SiMe}_3)_2)_3$  (0.040 г, 0.0633 ммоль), охлажденную жидким азотом, конденсировали ~10 мл ТГФ. Полученный красный раствор перемешивали в течение суток при комнатной температуре, затем концентрировали до объема ~2 мл. Образовавшиеся красные кристаллы продукта отфильтровывали и высушивали в вакууме. Выход 0.010 г (20%).

Найдено, %: C 47.7; H 4.0; N 14.0; S 10.0.  
Для  $\text{C}_{33}\text{H}_{30}\text{N}_9\text{O}_3\text{S}_3\text{Sm} \cdot 0.5\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$   
Вычислено, %: C 47.6; H 3.9; N 14.3; S 10.9.

**Синтез  $[\text{Gd}(\text{L})_3] \cdot 0.5\text{C}_7\text{H}_8$ .** На смесь твердых  $\text{Gd}(\text{N}(\text{SiMe}_3)_2)_3$  (0.050 г, 0.078 ммоль) и LH (0.056 г, 0.24 ммоль), охлажденную жидким азотом, кон-

денсировали ~10 мл толуола. Реакционную смесь перемешивали при 50°C в течение 3 сут. Темно-красный раствор фильтровали и упаривали досуха. Полученный маслянистый остаток промывали гексаном для получения порошкообразного продукта и высушивали в вакууме. Выход 0.043 г (60%). Кристаллы, пригодные для РСА, получали при упаривании раствора комплекса в смеси толуол–ТГФ (1 : 1).

Найдено, %: C 49.8; H 4.6; N 13.6; S 10.6.  
Для  $\text{C}_{33}\text{H}_{30}\text{N}_9\text{O}_3\text{S}_3\text{Gd} \cdot 0.5\text{C}_7\text{H}_8$   
Вычислено, %: C 48.7; H 3.8; N 14.0; S 10.7.

**Реакция  $\text{EuCl}_3$  с LH и  $\text{KN}(\text{SiMe}_3)_2$ .** На смесь твердых LH (0.068 г, 0.29 ммоль),  $\text{KN}(\text{SiMe}_3)_2$  (0.057 г, 0.028 ммоль) и  $\text{EuCl}_3$  (0.026 г, 0.10 ммоль),

охлажденную жидким азотом, конденсировали ~10 мл ТГФ. Полученный красный раствор с белесым осадком перемешивали при 50°C в течение 3 сут. Раствор фильтровали и концентрировали до 1 мл, при этом в небольшом количестве образовались пригодные для РСА красные кристаллы соединения  $[\text{Eu}(\text{L})_3] \cdot 0.5\text{TГФ}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для синтеза комплексов Sm(III) и Gd(III) с 4-(2,1,3-бензотиадиазол-4-иламино)-пент-3-ен-2-онатом ( $\text{L}^-$ ) было использовано взаимодействие силилированных амидов  $\text{Ln}(\text{N}(\text{SiMe}_3)_2)_3$  с LH (схема 1). Это достаточно распространенный подход, основанный на взаимодействии кислотно-основного типа. В результате реакции происходит перенос протона от “сильной” кислоты LH к координированному аниону  $(\text{N}(\text{SiMe}_3)_2)^-$ , элиминирование “слабой” кислоты  $\text{HN}(\text{SiMe}_3)_2$  и координация  $\text{L}^-$  к катиону лантанида. Взаимодействием  $\text{Ln}(\text{N}(\text{SiMe}_3)_2)_3$  с LH были получены соединения  $[\text{Ln}(\text{L})_3]$ , выделенные в виде кристаллических фаз  $[\text{Sm}(\text{L})_3] \cdot 0.5\text{TГФ}$  и  $[\text{Gd}(\text{L})_3] \cdot 0.5\text{C}_7\text{H}_8$  с выходами 20 и 60% соответственно.

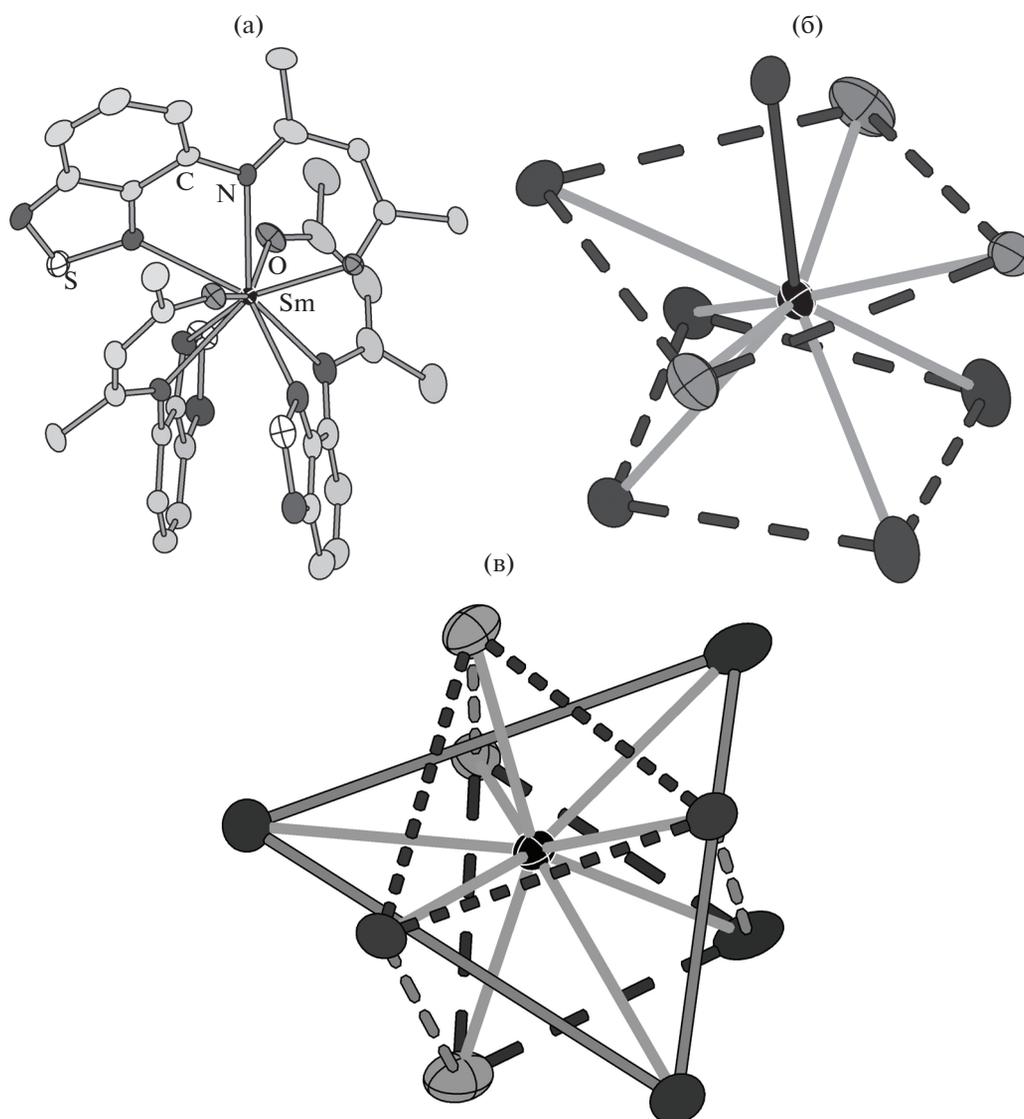
По неизвестным причинам выход  $\text{Eu}(\text{N}(\text{SiMe}_3)_2)_3$  при его синтезе по стандартной методике из  $\text{EuCl}_3$  и  $\text{LiN}(\text{SiMe}_3)_2$  воспроизводится нестабильно. Иногда он не превышает 10% [24]. Чтобы избежать данной стадии, для синтеза комплекса Eu(III) был использован другой вариант – взаимодействие  $\text{EuCl}_3$  с LH в присутствии сильного основания  $\text{KN}(\text{SiMe}_3)_2$  (схема 1). Однако выход в данной реакции оказался крайне низким: при концентрировании маточного раствора удалось выделить лишь несколько кристаллов целевого продукта  $[\text{Eu}(\text{L})_3] \cdot 0.5\text{TГФ}$ .

Строение всех комплексов установлено методом РСА на монокристаллах. Все полученные соединения изотипны. Различие структур состоит в наличии разных молекул сольватного растворителя: ТГФ в случае Sm и Eu и толуола для Gd. По сравнению с опубликованными ранее данными о комплексе  $[\text{Zn}(\text{L})_2]$  [18] лиганд в  $[\text{Ln}(\text{L})_3] \cdot 0.5\text{Solv}$  связан с металлом другим способом: кроме атомов N и O кетоиминатного фрагмента в координации участвует еще атом N гетероцикла (рис. 1а). Таким образом, в данных соединениях  $\text{L}^-$  является тридентатным лигандом. КЧ центрального атома равно 9, и ближайшее окружение Ln можно описать трехшапочной тригональной призмой с тремя дополнительными вершинами над боковыми гранями (рис. 1б) или квадратной одношапочной антипризмой с одной дополнительной вершиной над основанием (рис. 1в).

Длины связей Ln–N и Ln–O варьируют в широких пределах 2.58–2.77 и 2.28–2.36 Å соответ-

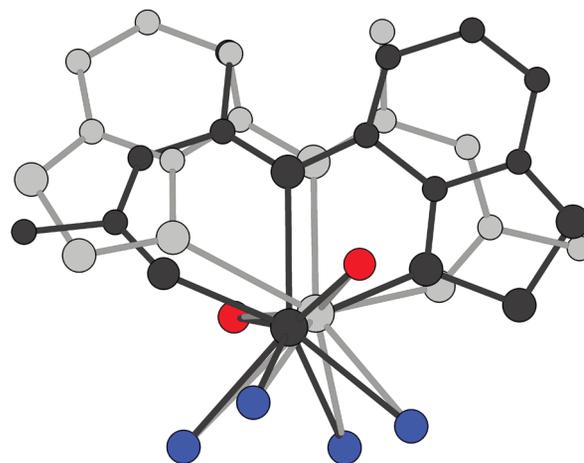
ственно, что характерно для комплексов лантанидов (анализ длин связей проводили только для фрагментов с целой и наибольшей для разупорядоченных атомов занятостью позиций, см. далее). Корреляции длины связи Ln–N и типа атома азота (тиадиазольного фрагмента или иминогруппы) не наблюдается, т.е. расположение лигандов относительно центральных атомов обусловлено в значительной степени стерическими факторами. Поскольку Sm, Eu и Gd имеют близкие ионные радиусы, значимых различий в длинах связей Ln–N и Ln–O нет. В отличие от комплекса  $[\text{ZnL}_2]$  с плоским строением металлоцикла, атомы Ln в  $[\text{Ln}(\text{L})_3] \cdot 0.5\text{Solv}$  существенно отклоняются от плоскости кетоиминатного фрагмента (в среднем на 0.8 Å). По-видимому, искажение связано с различной дентатностью лиганда (бидентатная в комплексе Zn и тридентатная в комплексах Ln). Особенностью структур исследованных соединений является то, что атом Ln и один из трех лигандов разупорядочены по двум позициям (рис. 2). В разных кристаллах их уточненная заселенность составляет от 92/8 до 84/16%. Расстояние между разупорядоченными атомами Ln не превышает 0.62 Å. Соответствующие координированные гетероатомы в лиганде также попарно имеют близкие позиции, однако атом O одного разупорядоченного фрагмента находится рядом с атомом N гетероцикла другого, т.е. данные фрагменты располагаются по типу “голова” к “хвосту” (рис. 2). Несмотря на такое расположение, разупорядоченные фрагменты занимают практически идентичный объем пространства, что и приводит к сбою в упаковке молекул комплексов. Данный феномен разупорядочения обнаружен для всех образцов монокристаллов комплексов.

Таким образом, в комплексах тиадиазольные фрагменты находятся достаточно близко к центральным атомам, что немаловажно для осуществления эффективного переноса энергии возбуждения с лиганда на ионы лантанидов [29]. С другой стороны, цвет комплексов  $[\text{Ln}(\text{L})_3] \cdot 0.5\text{Solv}$  ярко-красный, т.е. полоса эмиссии ионов  $\text{Sm}^{3+}$  и  $\text{Eu}^{3+}$  слишком близка по энергии к полосе поглощения комплексов и, как следствие, процесс переноса энергии с лиганда на эти лантаниды с последующим излучением маловероятен [29]. Действительно, в спектре эмиссии  $[\text{Sm}(\text{L})_3] \cdot 0.5\text{TГФ}$  не наблюдается характерной лантанид-центрированной люминесценции, а лишь широкая полоса, относящаяся к внутрелигандным переходам (рис. 3). Максимум этой полосы при 625 нм сдвинут в длинноволновую область по сравнению со свободным LH (595 нм). Важно отметить, что комплекс  $[\text{Zn}(\text{L})_2]$  с бидентатной координацией лиганда только атомами кетоиминатного фрагмента имеет желтый цвет: положение длинноволновой полосы поглощения этого соединения



**Рис. 1.** Строение соединений  $[Ln(L)_3] \cdot 0.5Solv$  на примере  $Ln = Sm$ . Эллипсоиды приведены с вероятностью 50%. Разупорядочение, атомы Н и сольватные молекулы не показаны (а). Ближайшее координационное окружение Ln (б, в).

практически идентично таковой для исходного ЛН [18]. На основании имеющихся данных можно заключить, что батохромный сдвиг длинноволновой полосы комплексов  $[Ln(L)_3] \cdot 0.5Solv$  определен наличием связи металла с атомом N гетероцикла, отсутствующей в  $[Zn(L)_2]$ . Подобный феномен наблюдается и в ряде комплексов Zn, Cd и Ag с архетипным 4-амино-2,1,3-бензотиадиазолом [18–21]: в том случае, когда этот лиганд координирован монодентатно атомом N аминогруппы, полоса поглощения и эмиссии смещена в коротковолновую область. Если лиганд координирован монодентатно атомом N гетероцикла или мостиковым образом, то данная полоса смещается в длинноволновую область. С этим предположением согласуются как эксперимен-



**Рис. 2.** Схема разупорядочения центрального атома и лиганда соединений  $[Ln(L)_3] \cdot 0.5Solv$  на примере  $Ln = Sm$ .

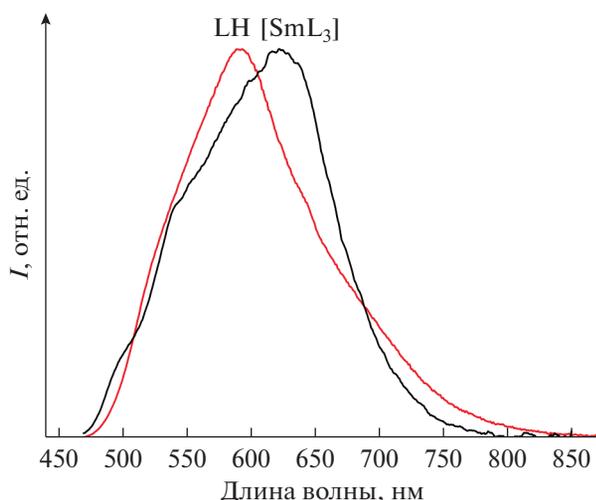


Рис. 3. Нормированные спектры фотолюминесценции твердых образцов LH и  $[\text{Sm}(\text{L})_3] \cdot 0.5\text{TGF}$ .

тальные данные, так и результаты квантово-химических расчетов [20].

Таким образом, в настоящей работе получены новые комплексы с 4-(2,1,3-бензотиадиазол-4-иламино)-пент-3-ен-2-онатом  $[\text{Ln}(\text{L})_3] \cdot 0.5\text{Solv}$  ( $\text{Ln} = \text{Sm}, \text{Eu}, \text{Gd}$ ;  $\text{Solv} = \text{TGF}, \text{C}_7\text{H}_8$ ), строение которых установлено методом РСА. В структурах обнаружен феномен разупорядочения, возникающего из-за близких объемов кетоиминового и бензотиадиазольного фрагментов. Обнаружена корреляция способа координации лиганда и положения длинноволновой полосы в электронных спектрах комплексов с  $\text{L}^-$ .

Авторы благодарят А.П. Зубареву и О.С. Кошееву за проведение элементного анализа и А.А. Рядуна за запись спектров люминесценции.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 16-03-00637).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Neto B.A.D., Lapis A.A.M., da Silva Júnior E.N. et al. // Eur. J. Org. Chem. 2013. P. 228.
2. Gu C., Liu D., Wang J. et al. // J. Mater. Chem. A. 2018. V. 6. P. 2371.
3. Crossley D.L., Urbano L., Neumann R. et al. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2017. V. 9. P. 28243.
4. Chulanova E.A., Pritchina E.A., Malaspina L.A. et al. // Chem. Eur. J. 2017. V. 23. P. 852.
5. Lonchakov A., Rakitin O., Gritsan N, et al. // Molecules. 2013. V. 18. P. 9850.
6. Xu Z., Kong L., Wang Y, et al. // Org. Electron. 2018. V. 54. P. 94.
7. Neto B.A.D., Carvalho P.H.P.R., Correa J.R. // Acc. Chem. Res. 2015. V. 48. P. 1560.
8. da Cruz E.H.G., Carvalho P.H.P.R., Correa J.R. et al. // New J. Chem. 2014. V. 38. P. 2569.
9. Mota A.A.R., Corrêa J.R., Carvalho P.H.P.R. et al. // J. Org. Chem. 2016. V. 81. P. 2958.
10. Aguiar L.d.O., Regis E., Tuzimoto P. et al. // Liq. Cryst. 2018. V. 45. P. 49.
11. Langis-Barsetti S., Maris T., Wuest J.D. // J. Org. Chem. 2017. V. 82. P. 5034.
12. Cheng Q., Han X., Tong Y. et al. // Inorg. Chem. 2017. V. 56. P. 1696.
13. Plebst S., Bubrin M., Schweinfurth D. et al. // Z. Naturforsch. B. 2017. V. 72. P. 839.
14. Goswami S., Winkel R.W., Schanze K.S. // Inorg. Chem. 2015. V. 54. P. 10007.
15. Mancilha F.S., Barloy L., Rodembusch F.S. et al. // Dalton Trans. 2011. V. 40. P. 10535.
16. Gallardo H., Conte G., Bortoluzzi A.J. et al. // Inorg. Chim. Acta. 2011. V. 365. P. 152.
17. Gallardo H., Conte G., Tuzimoto P. et al. // Inorg. Chem. Commun. 2008. V. 11. P. 1292.
18. Sukhikh T.S., Bashirov D.A., Ogienko D.S. et al. // RSC Adv. 2016. V. 6. P. 43901.
19. Sukhikh T.S., Ogienko D.S., Bashirov D.A. et al. // J. Coord. Chem. 2016. V. 69. P. 3284.
20. Sukhikh T.S., Komarov V.Y., Konchenko S.N. et al. // Polyhedron. 2018. V. 139. P. 33.
21. Sukhikh T.S., Bashirov D.A., Shuvaev S. et al. // Polyhedron. 2018. V. 141. P. 77.
22. Sukhikh T.S., Bashirov D.A., Kolybalov D.S. et al. // Polyhedron. 2017. V. 124. P. 139.
23. Sukhikh T.S., Bashirov D.A., Kuratieva N.V. et al. // Dalton Trans. 2015. V. 44. P. 5727.
24. Herrmann W.A. Synthetic Methods of Organometallic and Inorganic Chemistry: Lanthanides and Actinides. Thieme Publishing Group, 1997. V. 6.
25. APEX2 (version 2.0). SAINT (version 8.18c), and SADABS (version 2.11). Madison (WI, USA): Bruker Advanced X-ray Solutions, 2000–2012.
26. Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr. A. 2008. V. 64. P. 112.
27. Sheldrick G.M. // Acta Crystallogr. C. 2015. V. 71. P. 3.
28. Dolomanov O.V., Bourhis L.J., Gildea R.J. et al. // J. Appl. Crystallogr. 2009. V. 42. P. 339.
29. Armelao L., Quici S., Barigelletti F. et al. // Coord. Chem. Rev. 2010. V. 254. P. 487.