

СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА  
И КВАНТОВАЯ ХИМИЯ

УДК 546.661:535.37

ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА РАЗНОЛИГАНДНЫХ  
ХИНАЛЬДИНАТОВ НЕОДИМА(III)

© 2023 г. И. В. Калиновская<sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup>Институт химии Дальневосточного отделения Российской академии наук Россия, Владивосток, 690022, Россия

\*e-mail: kalinovskaya@ich.dvo.ru

Поступила в редакцию 13.12.2022 г.

После доработки 11.05.2023 г.

Принята к публикации 12.05.2023 г.

Синтезированы комплексные соединения неодима(III) с анионом хинальдиновой кислоты, а также азот- и фосфорсодержащими нейтральными лигандами. Разнолигандные соединения охарактеризованы методами элементного, рентгенофазового анализа и ИК-спектроскопии. С помощью термического анализа исследовано термическое поведение полученных соединений в атмосфере воздуха в интервале температур 25–700°C. Показано, что при термоллизе комплексов отрыв молекулы нейтрального лиганда происходит в одну стадию с эндотермическим эффектом, соединения являются термически устойчивыми до 250°C. Методом ИК-спектроскопии установлено, что в разнолигандных хинальдинатах неодима(III) реализуется бидентатно-мостиковая координация аниона кислоты к центральному иону неодима(III). Изучены люминесцентные свойства хинальдинатов неодима(III).

*Ключевые слова:* комплексные соединения неодима(III), люминесценция, хинальдиновая кислота

DOI: 10.31857/S0044453723110146, EDN: GUCWRL

Разнолигандные комплексные соединения неодима(III), люминесцирующие в ближней инфракрасной области, представляют значительный интерес в качестве преобразователей ультрафиолетового излучения в излучение ближнего инфракрасного диапазона, что является важным при решении ряда биомедицинских задач [1, 2]. Данные преобразователи могут найти применение для увеличения чувствительности в ультрафиолетовой области спектра кремниевых приемников, собственная чувствительность которых значительна в ближнем инфракрасном диапазоне, в лазерной технике и оптоэлектронике [3–5]. Изучена ИК люминесценция комплексных соединений неодима(III) с анионами β-дикетонных, порфириновых, фторированных кислот, в основном в растворах [6–11]. В качестве β-дикетонных были использованы, например, длинноцепочечные производные ацетилацетона, содержащие во фторированном радикале остатки перфторэнантовой и перфторпеларгоновой кислот [10]. Полученные нами ранее разнолигандные соединения неодима(III) с анионом метилбензойной кислоты обладают интенсивной люминесценцией в ближней инфракрасной области [12]. Наиболее фотоустойчивыми и интенсивно люминесцирующими являются комплексные соединения лантаноидов на основе ароматических кислот [13–18], которые имеют развитую систему сопряженных связей и

проявляют наибольшую дентатность вследствие наличия в качестве заместителя атома азота. Представителем группы соединений, имеющих высокий квантовый выход, являются комплексные соединения с анионом хинальдиновой (2-хинолинкарбоновой) кислоты [19, 20]. Так, была изучена структура тригидрата хинальдината неодима(III), который является димером [19]. Наличие двух функциональных групп у хинальдиновой кислоты и возможные различные способы координации карбоксильной группы могут приводить к появлению нескольких рядов разнолигандных хинальдинатов редкоземельных элементов с интересными люминесцентными свойствами. Нами были синтезированы разнолигандные комплексные соединения европия(III) с хинальдиновой кислотой островного и полимерного строения [21, 22]. Актуальной задачей является расширение диапазона люминесценции от видимой области до ближней инфракрасной.

Цель настоящей работы – получение новых разнолигандных хинальдинатов неодима(III) с нейтральными лигандами состава NdL<sub>3</sub>·D·H<sub>2</sub>O, где L – анион хинальдиновой кислоты (Quin), D – гексаметилфосфотриамид (hmpa), бензотриазол (bt), диметилформамид (dmf), дигексилсульфоксид (dhsO), изучение их термической устойчивости, способа координации кислотного остатка

**Таблица 1.** Данные элементного анализа комплексных соединений неодима(III)

Соединение	Найдено, %					Вычислено, %				
	C	H	N	Nd	H <sub>2</sub> O	C	H	N	Nd	H <sub>2</sub> O
Nd(Quin) <sub>3</sub> hmpa·H <sub>2</sub> O	50.8	4.5	10.0	17.3	2.5	50.4	4.2	9.8	16.9	2.1
Nd(Quin) <sub>3</sub> dmf·H <sub>2</sub> O	52.7	4.0	7.5	19.6	2.8	52.7	3.6	7.5	19.2	2.4
Nd(Quin) <sub>3</sub> bt·H <sub>2</sub> O	49.3	7.9	11.0	18.5	2.6	49.7	7.7	10.5	18.1	2.3
Nd(Quin) <sub>3</sub> dhsO·H <sub>2</sub> O	52.5	5.4	5.1	16.6	2.5	52.2	5.1	4.7	16.1	2.0

хинальдиновой кислоты и нейтральных лигандов, а также люминесцентных свойств.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для синтеза разнолигандных комплексных соединений неодима(III) состава NdL<sub>3</sub>·D·H<sub>2</sub>O использовали следующие препараты марки “х.ч.”: шестиводный нитрат неодима(III), хинальдиновую кислоту, нейтральные лиганды (hmpa, bt, dmf, dhsO).

Хинальдиновую кислоту перекристаллизовывали из 96% этанола.

Аддукты хинальдинатов неодима(III) получали при смешивании шестиводного хлорида неодима(III), хинальдиновой кислоты и нейтрального лиганда в мольном отношении 1 : 3 : 1.5 в этаноле (80% раствор). pH реакционной смеси доводили до 6–7 с помощью 10% раствора аммиака. Полученный раствор оставляли стоять до образования осадка. Кристаллический осадок отфильтровывали, промывали водно-этанольной смесью (соотношение воды к этанолу 1 : 3) и сушили на воздухе. Выход разнолигандных комплексных соединений составил 75–85%.

Полученные комплексные соединения неодима(III) представляют собой мелкокристаллические порошки сиреневого цвета. Данные соединения малорастворимы в полярных растворителях, нерастворимы в воде.

Химический анализ разнолигандных соединений выполняли на анализаторе Euro EA 3000. Содержание воды определяли титрованием по Фишеру. Содержание неодима(III) устанавливали весовым методом: прокаливая навеску комплексного соединения до постоянного веса окиси неодима(III).

По данным элементного химического анализа состав синтезированных комплексных соединений неодима(III) с хинальдиновой кислотой отвечает формуле состава NdL<sub>3</sub>·D·H<sub>2</sub>O (табл. 1).

Термогравиметрическое исследование проводили с использованием дериватографа Q-1000 в открытом платиновом тигле на воздухе. Вещество сравнения – прокаленная окись алю-

миния, скорость нагревания – 5 град/мин, чувствительность–100.

Для ИК-спектров пропускания порошков комплексных соединений готовили таблетки с KBr. Спектральный анализ проводили в диапазоне волновых чисел 350–4000 см<sup>-1</sup> с использованием прибора TENSOR-27 BRUKER.

Рентгенофазовый анализ (РФА) синтезированных соединений проводили порошковым методом. Порошковые образцы снимали на дифрактометре ДРОН-2,0 в CuK<sub>α</sub>-излучении. Люминесценция возбуждалась ксеноновой лампой (ДКсШ-130) в диапазоне 350–650 нм. Оптически фильтрами СЗС-23 и СЗС-26 выделяли полосу 450–650 нм. Образцы регистрировали при комнатной температуре.

Электронные спектры поглощения синтезированных комплексных соединений неодима(III) регистрировали в растворах (этиловый спирт, концентрация 10<sup>-5</sup> моль/л) на спектрометре RF-2550 Shimadzu.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разнолигандные комплексные соединения неодима(III) с хинальдиновой кислотой не разлагаются при длительном хранении. Рентгенографическое исследование соединений неодима(III), выполненное по методу порошка, подтвердило их индивидуальность, определены кристаллографические параметры синтезированных комплексов неодима(III). Согласно данным табл. 2 фазовый анализ свидетельствует об отсутствии рефлексов исходных веществ и возможных примесей. Хинальдинаты неодима(III) с диметилформамидом и дигексилсульфоксидом являются рентгеноаморфными.

Разнолигандные хинальдинаты неодима(III) устойчивы на воздухе.

Для получения функциональных оптических материалов, применяемых в медицине, оптоэлектронике, лазерной технике необходимо использовать термоустойчивые комплексы редкоземельных элементов. В связи с этим нами было осуществлено исследование термолиза получен-

**Таблица 2.** Рентгенометрические данные соединений неодима(III) с хинальдиновой кислотой и нейтральными лигандами

Nd(Quin) <sub>3</sub> hmpa·H <sub>2</sub> O		Nd(Quin) <sub>3</sub> bt·H <sub>2</sub> O		Nd(Quin) <sub>3</sub> dmf·H <sub>2</sub> O	
<i>d</i> , Å	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>0</sub>	<i>d</i> , Å	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>0</sub>	<i>d</i> , Å	<i>I</i> / <i>I</i> <sub>0</sub>
11.37	41.10	14.22	39.0	14.74	54.6
10.10	21.0	10.78	29.09	10.59	100.0
6.50	31.52	7.91	100.00	6.35	56.2
6.40	40.0	7.61	31.36	3.60	47.7
5.95	62.38	6.40	34.55		
5.39	25.23	5.68	67.27		
5.02	43.81	5.43	23.64		
4.81	32.29	5.03	32.73		
4.52	35.38	4.41	32.73		
4.38	40.90	4.17	50.64		
4.26	28.67	3.96	33.64		
4.08	14.29	3.89	33.36		
3.95	90.05	3.54	25.45		
3.58	21.40	3.29	62.91		
3.47	84.00	2.95	43.73		
3.35	16.00	2.71	32.73		
2.74	100.00	2.24	15.55		

ных разнолигандных комплексных соединений неодима(III) в интервале температур 25–700°C.

Термическая деструкция полученных соединений неодима(III) является многоступенчатым процессом (рис. 1).

Проведенный термический анализ соединений неодима(III) с анионом хинальдиновой кислоты показывает, что в интервале температур 90–235°C происходит отщепление молекулы воды, связанной в комплекс. Процесс дегидратации синтезированных комплексных соединений неодима(III) протекает в одну стадию с эндотермическими эффектами.

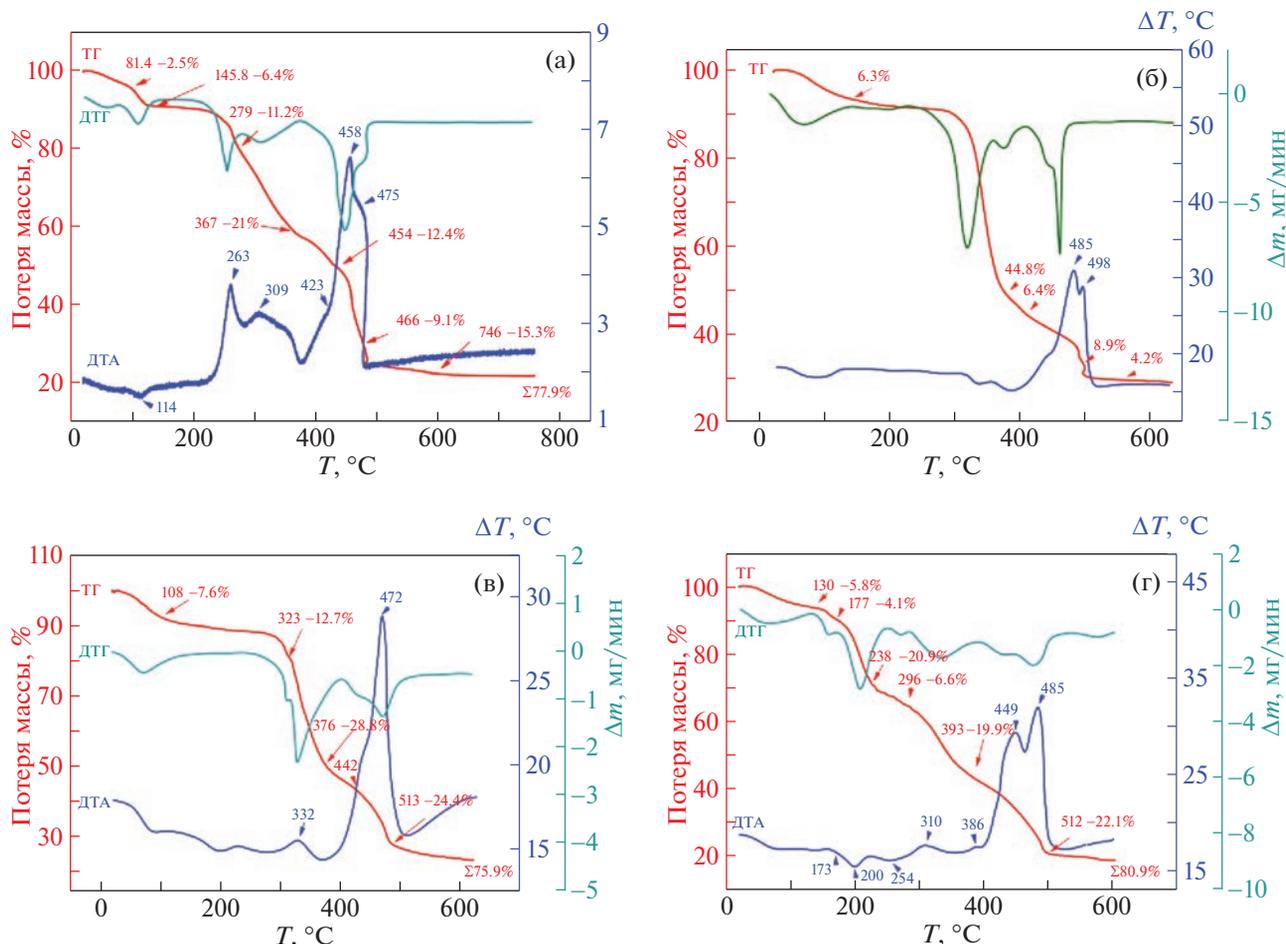
Отрыв молекул нейтральных лигандов протекает с эндотермическим эффектом в интервале температур 230–400°C. При более высоких температурах (410–540°C) осуществляется отрыв хинальдинат-аниона. Данному процессу на дифференциальных кривых нагревания и потери массы (ДТА и ДТГ) отвечают экзотермические и эндотермические эффекты. В процессе термолитиза для полученных нами комплексных соединений неодима(III) на конец отщепления нейтрального лиганда накладывается процесс разложения органической части соединений, поэтому невозможно получить безводное комплексное соединение состава Nd(Quin)<sub>3</sub>. Интенсивная деструкция синтезированных разнолигандных комплексных хинальдинатов неодима(III), связанная с образова-

нием оксида неодима(III), наблюдается в интервале температур 550–700°C и осуществляется с экзотермическим эффектом.

Разнолигандное комплексное соединение — Nd(Quin)<sub>3</sub>hmpa·H<sub>2</sub>O в ряду исследуемых соединений неодима(III) с хинальдиновой кислотой является наиболее термически устойчивым. В указанном ряду соединений данный комплекс наиболее стабилен до этапа удаления воды.

Синтезированные комплексные соединения неодима(III) сопоставимы по термической устойчивости с разнолигандными метилбензоатами европия(III). Наблюдаемую термическую устойчивость комплексных соединений неодима(III) с хинальдинат-анионом можно объяснить наличием в структуре аниона хинальдиновой кислоты конденсированных колец.

Определение координации нейтральных лигандов, способа координации аниона хинальдиновой кислоты к иону неодима(III) было проведено методом ИК-спектроскопии. Отнесение полос сделано на основании литературных данных [23, 24]. На наличие депротонированной карбоксильной группы в комплексных соединениях указывает исчезновение полосы деформационного колебания ОН-группы при 990 см<sup>-1</sup> [23]. Поглощение карбонильной группы “свободной” хинальдиновой кислоты при 1705 см<sup>-1</sup> в спектрах хинальдинатов европия(III) отсутствует [23]. Ин-



**Рис. 1.** Термограммы хинальдинов неодиима(III): а – Nd(Quin)<sub>3</sub> hmpa·H<sub>2</sub>O; б – Nd(Quin)<sub>3</sub> bt·H<sub>2</sub>O; в – Nd(Quin)<sub>3</sub> dmf·H<sub>2</sub>O, г – Nd(Quin)<sub>3</sub> dhsO·H<sub>2</sub>O; TG – кривая потери веса, DTG – кривая дифференциальной термогравиметрии, DTA – кривая дифференциального термического анализа.

тенсивные полосы в области 1590–1610, 1490–1550 см<sup>-1</sup> можно отнести к валентным колебаниям ν<sub>as</sub>(COO<sup>-</sup>) и ν(C=C) бензольного кольца. Поглощение ν<sub>s</sub>(COO<sup>-</sup>) наблюдается в области 1410–1420 см<sup>-1</sup> [23, 24]. Разность частот Δν = ν<sub>as</sub>(COO<sup>-</sup>) – ν<sub>s</sub>(COO<sup>-</sup>) меньше 200 см<sup>-1</sup>, что соответствует бидентатно-мостиковой координации карбоксильной группы хинальдиновой кислоты ионом неодиима [23]. Смещение полосы ν<sub>as</sub>(COO<sup>-</sup>) в высокочастотную область в ИК-спектрах соединений и большая величина Δν могут указывать на увеличение ковалентности связи Nd–O Quin [23, 24]. Поглощение меньшей интенсивности при 1602, 1556 см<sup>-1</sup> обусловлено валентными колебаниями связей C=C и C=N нейтрального лиганда.

Для комплексных соединений неодиима(III) с фосфорсодержащими нейтральными лигандами в ИК-спектрах наблюдаются существенные отличия. О координации фосфорсодержащего лиганда свидетельствует появление характеристических

полос поглощения ν(P=O) в области 1160 см<sup>-1</sup>, отсутствующих в ИК-спектре гидрата европия(III) с хинальдионат-анионом. Причем, полосы поглощения ν(P=O) в ИК-спектре смещены в сторону низких частот, по сравнению с их положением в спектрах несвязанных фосфорсодержащих лигандов (ν(P=O) ~ 1195–1210 см<sup>-1</sup>) на 35 см<sup>-1</sup>, что свидетельствует о координации данных лигандов через фосфорильный кислород [23].

В области 3100–3500 см<sup>-1</sup> в ИК-спектрах некоторых разнолигандных комплексных соединений неодиима(III) наблюдается размытая полоса, обусловленная валентными колебаниями воды [23]. Колебания Ln–N, Ln–O в разнолигандных хинальдинатах лежат ниже 400 см<sup>-1</sup> [23, 24].

Разнолигандные соединения неодиима(III) с хинальдиновой кислотой поглощают в диапазоне длин волн 220–320 нм (45 500–31 300 см<sup>-1</sup>) (рис. 2). В полученных спектрах к полосам поглощения хинальдиновой кислоты добавляются полосы, соответствующие π-π\*-переходам аддуктообразу-

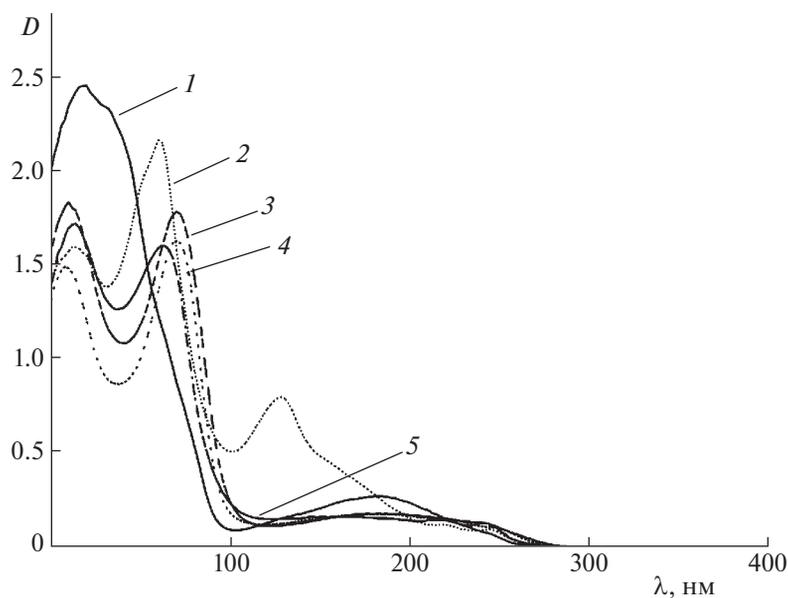


Рис. 2. Электронные спектры поглощения  $10^{-4}$  М растворов ( $C_2H_5OH$ ): 1 –  $Nd(Quin)_3dmf \cdot H_2O$ ; 2 –  $Nd(Quin)_3bt \cdot H_2O$ ; 3 –  $Nd(Quin)_3 \cdot H_2O$ ; 4 –  $Nd(Quin)_3 \cdot dhsO \cdot H_2O$ ; 5 –  $Nd(Quin)_3hmpa \cdot H_2O$ ; D – оптическая плотность.

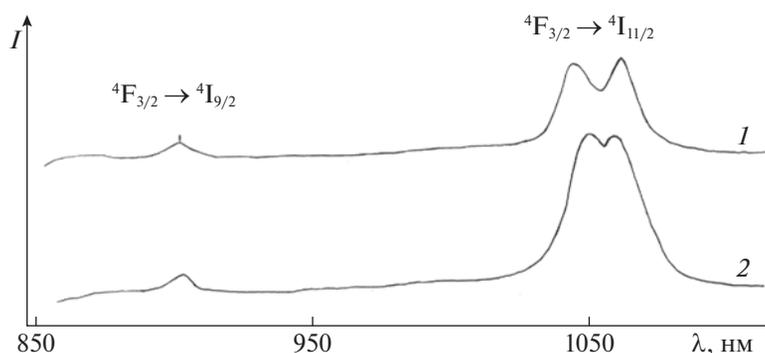


Рис. 3. Спектры люминесценции: 1 –  $Nd(Quin)_3hmpa \cdot H_2O$ , 2 –  $Nd(Quin)_3dmf \cdot H_2O$ .

ющих нейтральных лигандов — гексаметилфосфотриамида, бензотриазола, диметилформамида, дигексилсульфоксида. Положение и форма полос хинальдиновой кислоты и нейтральных лигандов практически не изменяется при комплексообразовании. Проявляется незначительный батхромный сдвиг в спектрах поглощения комплексов хинальдиноватов неодима(III) по сравнению с исходными лигандами. Сопоставление спектров поглощения полученных хинальдиноватов неодима(III) показывает, что синтезированные комплексные соединения имеют близкие максимумы поглощения ( $\lambda_{max} = 270\text{--}315$  нм). Наибольшая интенсивность поглощения характерна для комплексного соединения неодима(III) с гексаметилфосфотриамидом. Анализ электронных спектров поглощения хинальдиновой кислоты

позволяет отнести положение синглетных уровней к области  $34400\text{--}45000$   $cm^{-1}$ . Положение триплетного уровня хинальдиновой кислоты составляет  $18050$   $cm^{-1}$  [22].

На рис. 3 представлены спектры флуоресценции кристаллических хинальдиноватов неодима(III) с нейтральными лигандами. Люминесценцию синтезированных соединений неодима(III) регистрировали при комнатной температуре в области  $850\text{--}1100$  нм. В спектрах люминесценции разнолигандных комплексных соединений проявляются полосы двух переходов. Одна полоса небольшой интенсивности с центром тяжести около  $905\text{--}910$  нм соответствует переходу (переход  ${}^4F_{3/2}\text{--}{}^4I_{9/2}$ ), а вторая с  $\lambda_{max} = 1060\text{--}1065$  нм — переходу  ${}^4F_{3/2}\text{--}{}^4I_{11/2}$  (рис. 3). Обе полосы имеют расщепленную структуру. Проведено сопоставление

**Таблица 3.** Относительная интегральная интенсивность полос  ${}^2F_{3/2}-{}^4I_{11/2}$  перехода соединений хинальдинов неодиима(III)

Соединение	$I_{rel}({}^4F_{3/2}-{}^4I_{11/2}), \%$	Соединение	$I_{rel}({}^4F_{3/2}-{}^4I_{11/2}), \%$
Nd(Quin) <sub>3</sub> hmpa·H <sub>2</sub> O	100.0	Nd(Quin) <sub>3</sub> dmf·H <sub>2</sub> O	55.0
Nd(Quin) <sub>3</sub> bt·H <sub>2</sub> O	67.0	Nd(Quin) <sub>3</sub> dhsO·H <sub>2</sub> O	35.0

относительной интенсивности полос  ${}^4F_{3/2}-{}^4I_{11/2}$  перехода синтезированных хинальдинов неодиима(III) (табл. 3). Из табл. 3 видно, что интенсивность люминесценции у синтезированных хинальдинов неодиима(III) невысока по сравнению с метилбензоатами и  $\beta$ -дикетонатами неодиима. Наибольшей интенсивностью люминесценции в ближней инфракрасной области среди полученных комплексов соединений обладает комплекс с хинальдиновой кислотой и гексаметилфосфотриамидом (табл. 3). Нами было установлено, что изоструктурные хинальдинатам неодиима(III) соединения европия(III) с хинальдиновой кислотой обычно являются мономерами. Небольшая интенсивность люминесценции разнолигандных соединений неодиима(III) с хинальдиновой кислотой, очевидно, вызвана близостью триплетных уровней хинальдиновой кислоты к  ${}^2,4G_{7/2,5/2}$  — уровню неодиима(III), что обуславливает эффективное заселение триплетных уровней лигандов [22]. При этом возрастает роль конкурентных механизмов внутрилигандной дезактивации. Замена нейтральных молекул в разнолигандных хинальдинатах неодиима(III) — гексаметилфосфортриамида, бензотриазол, диметилформамида и дигексилсульфоксида — приводит к изменению интенсивности люминесценции.

Таким образом, изучен процесс синтеза комплексных разнолигандных соединений неодиима(III) с хинальдиновой кислотой. На основании данных химического элементного анализа, рентгенофазового анализа и ИК-спектроскопии подтверждена индивидуальность полученных комплексных соединений. Методом ИК-спектроскопии установлен бидентатно-мостиковый способ координации хинальдинат-аниона к иону неодиима(III). Показано, что термическое разложение разнолигандных комплексных соединений происходит постадийно. Полученные соединения являются термически устойчивыми. Проведенные нами исследования люминесцентных свойств разнолигандных хинальдинов неодиима(III) показали, что наиболее интенсивно люминесцирующим в ИК-области среди синтезированных комплексных соединений является соединение неодиима(III) с хинальдиновой кислотой и гексаметилфосфотриамидом.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки, номер темы государственного задания FWF № (025)—2023-0003.

Автор заявляет, что у нее нет конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smola S., Rusakova N., Korovin Yu. // J. Coord. Chem. 2011. V. 64. № 5. P. 863.
2. Werts M.H.V., Woudenberg R.H., Emmerink P.G. et al. // Angew. Chem. Int. Ed. 2000. V. 39. № 24. P. 4542.
3. Петроченкова Н.В., Мирочник А.Г. // Оптика и спектр. 2020. Т. 128. № 1. С. 140. <https://doi.org/10.21883/OS.2020.01.48851.246-19>
4. Binnemans K. // Chem. Rev. 2020. V. 109. № 9. P. 4283. <https://doi.org/10.1021/cr8003983>
5. Каплин В.С., Копылов А.С., Зархина Т.С. и др. // Оптика и спектр. 2020. Т. 128. № 7. С. 869. <https://doi.org/10.21883/OS.2020.07>
6. Kuchmizhak A., Vitrik O., Kulchin Y. et al. // Nanoscale. 2016. V. 8. № 24. P. 12352. <https://doi.org/10.1039/c6nr01317a>
7. Мартынов А.Г., Сафонова Е.А., Горбунова Ю. и др. // ЖНХ. 2010. Т. 55. С. 389. <https://doi.org/10.1134/S0036023610030083>
8. Калиновская И.В., Николенко Ю.М. // Оптика и спектроскопия, 2018. Т. 125. № 3. С. 344. <https://doi.org/10.1134/S0030400X18090126>
9. Коровин Ю.В., Шевчук С.В., Бачериков В.А. и др. // ЖНХ. 2000. Т. 45. № 9. С. 1513.
10. Мешкова С.Б., Дога П.Г. // ЖАХ. 2020. Т. 75. № 3. С. 209–229. <https://doi.org/10.31857/S0044450220030147>
11. Коровин Ю.В. // Укр. хим. журн. 2000. Т. 66. № 10. С. 101.
12. Калиновская И.В., Задорожная А.Н., Николенко Ю.М. и др. // ЖНХ. 2006. Т. 51. № 3. С. 505. <https://doi.org/10.1134/S0036023606030181>
13. Калиновская И.В., Задорожная А.Н. // Оптика и спектр. 2019. Т. 127. № 5. С. 765. <https://doi.org/10.21883/OS.2019.11.48512>
14. Lam A.W.H., Wong W.T., Gao S. et al. // Eur. J. Inorg. Chem. 2003. № 1. P. 149. <https://doi.org/10.1002/ejic.200390021>
15. Kataoka H., Kitano T., Takizawa T. et al. // J. Alloys Compd. 2014. V. 601. P. 293. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.01.165>
16. Zhang J., Wang R., Bai J., and Wang S. // J. Rare Earths. 2002. V. 20. № 5. P. 449.

17. *Utochnikova V., Kovalenko A., Burlov A. et al.* // Dalton Trans 2015, 44:12660-12669.  
<https://doi.org/10.1039/C5DT01161B>
18. *Zhang J., Wang R., Liu H.-M.* // J. Therm. Anal. Cal. 2001. V. 66. P. 431.  
<https://doi.org/10.1023/A:1013186600293>
19. *Starynowicz P.* // Acta Cryst. 1990. V. 46. P. 2068.
20. *Bukvetskii B.V., Kalinovskaya I.V.* // J. Fluoresc. 2017. V. 27. № 3. P. 773.  
<https://doi.org/10.1007/s10895-016-2009-7>
21. *Калиновская И.В., Карасев В.Е.* // ЖНХ. 2003. Т. 48. № 8. С. 1307.
22. *Калиновская И.В., Карасев В.Е., Зайцева Н.Н.* // Там же. 1989. Т. 34. № 3. С. 1515.
23. *Zolin V.F.* // J. Alloys Compd. 2004. V. 380. № 1–2. P. 101.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.03.006>
24. *Золин В.Ф., Коренева Л.Г.* Редкоземельный зонд в химии и биологии. М.: Наука, 1980. 350 с.