

О ПРОДУКТАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ХЛОРИДА И БРОМИДА ГОЛЬМИЯ С КАРБАМИДОМ

Л.Ю. Аликберова, профессор, *Д.В. Альбов, младший научный сотрудник,

П.С. Кибальников, студент, Г.А. Федорова, заведующий лабораторией,

В.В. Кравченко, старший научный сотрудник, Н.С. Рукк, доцент

МИТХТ им. М.В. Ломоносова,

*Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

e-mail: alikberovalyu@mail.ru

Представлены синтез и данные исследования новых комплексных соединений бромидов и хлоридов гольмия с карбамидом (Ur) состава $[\text{Ho}(\text{Ur})_4(\text{H}_2\text{O})_4]\text{Br}_3$ (I), $[\text{Ho}(\text{Ur})_6(\text{H}_2\text{O})_2]\text{Br}_3$ (II) и $[\text{Ho}(\text{Ur})_4\text{Cl}_3]$ (III) методами ИК-спектроскопии и РСА. Координация Ur с металлом во всех случаях осуществляется через атомы кислорода. Координационные полиэдры атомов Ho в I и II – искаженные тетрагональные антипризмы ($\text{KЧ}=8$), бромид-ионы не координированы и находятся во внешней сфере. В кристаллах III наряду с четырьмя молекулами Ur атомом гольмия координированы три хлорид-иона, координационный полиэдр – пентагональная бипирамида ($\text{KЧ}=7$). Координация четырех молекул Ur в I-III не приводит к изменению их плоского строения, а пятая и шестая молекулы Ur подвергаются искажению. В структуре комплексов I-III реализуется большое число водородных связей.

The synthesis and data of the study of new complexes of samarium bromides with carbamide, $[\text{Ho}(\text{Ur})_4(\text{H}_2\text{O})_4]\text{Br}_3$ (I), $[\text{Ho}(\text{Ur})_6(\text{H}_2\text{O})_2]\text{Br}_3$ (II) and $[\text{Ho}(\text{Ur})_4\text{Cl}_3]$ (III), by IR spectroscopy and X-ray diffraction analysis are presented. For these compounds, coordination with metal occurs through the oxygen atoms of the water and carbamide molecules. The coordination polyhedra for I and II are distorted tetragonal antiprisms. In III, we have found inner-sphere coordination of four carbamide molecules and three chloride ions (the coordination polyhedron is a pentagonal bipyramid). The coordination of four carbamide molecules in I-III does not change their planar structures, but in II two carbamide ligands are distorted. Many hydrogen bonds are observed in the structures of complexes I-III.

Ключевые слова: комплексные соединения, строение, карбамид, гольмий, хлорид, бромид.

Key words: complexes, structure, carbamide, holmium, chloride, bromide.

Систематическое изучение продуктов взаимодействия солей редкоземельных элементов с карбамидом $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ (Ur) остается актуальной задачей исследователей, поскольку многие из получаемых комплексов обладают структурами клатратно-координационного типа [1], родственными супрамолекулярным соединениям, а сами комплексы могут служить прекурсорами для получения некоторых материалов новой техники. В частности, производные гольмия перспективны в технологии получения люминофоров.

Исследования в указанной области начались сравнительно давно [1]. Методом растворимости установлено, что в равновесных условиях при 15 и 30°C образуются соединения $\text{LnCl}_3 \cdot 4\text{Ur}$ и $\text{LnCl}_3 \cdot 6\text{Ur}$ ($\text{Ln} = \text{La}, \text{Ce}, \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd}, \text{Dy}, \text{Ho}, \text{Er}, \text{Tm}, \text{Yb}$ и Y) [2–6]. Авторами работ [3, 5, 6] отмечено также существование инконгруэнтно растворимых более сложных комплексов состава $\text{ErCl}_3 \cdot 2\text{Ur} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{TmCl}_3 \cdot 2\text{Ur} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $2\text{YCl}_3 \cdot \text{Ur} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Однако кристаллические структуры всех этих соединений не были изучены. Исключение составляют препаративно полученные карбамидные комплексы хлоридов лантана и эрбия, в которых обнаружено существование комплексных катионов $[\text{La}(\text{Ur})_6\text{Cl}_2]^+$ [7] и $[\text{Er}(\text{Ur})_6\text{Cl}_2]^{2+}$ [8] и некоординированных хлорид-ионов. Наше исследование методом РСА комплексных соединений хлорида иттрия с карбамидом состава $[\text{Y}(\text{Ur})_4(\text{H}_2\text{O})_4]\text{Cl}_3$ и $[\text{Y}(\text{Ur})_6(\text{H}_2\text{O})_2]\text{Cl}_3$ [9] показало, что комплексные катионы включают в

качестве лигандов только карбамид и воду, а хлорид-ионы не координированы атомами иттрия и находятся во внешней сфере.

Нами синтезированы и изучены методом РСА также комплексные соединения бромидов состава $[\text{Ln}(\text{Ur})_4(\text{H}_2\text{O})_4]\text{Br}_3$ ($\text{Ln} = \text{La}, \text{Er}, \text{Lu}$ и Y) и $[\text{Ln}(\text{Ur})_6(\text{H}_2\text{O})_2]\text{Br}_3$ ($\text{Ln} = \text{La}, \text{Er}$ и Lu) [8, 10]. Установлено, что в этих соединениях координация лигандов осуществляется через атомы кислорода молекул воды и карбамида. Координационные полиэдры – искаженные тетрагональные антипризмы ($\text{KЧ} = 8$). Бромид-ионы не координированы и находятся во внешней сфере.

Взаимодействие иодида гольмия с карбамидом приводит к образованию только одного комплекса состава $[\text{Ho}(\text{Ur})_4(\text{H}_2\text{O})_4]\text{I}_3$ [11]. Координация лигандов (молекул воды и карбамида) атомом гольмия осуществляется через атомы кислорода, а координационный полиэдр представляет собой искаженную квадратную антипризму ($\text{KЧ} = 8$). Иодид-ионы не координированы и находятся во внешней сфере.

Сведения о получении и свойствах комплексных соединений бромидов и хлоридов гольмия с карбамидом в литературе отсутствуют.

Цель настоящей работы – синтез и установление строения карбамидных соединений бромидов и хлоридов гольмия.

Экспериментальная часть

В качестве исходных для получения комплексных соединений бромидов и хлоридов голь-

мня использовали препараты гексагидратов бромид и хлорида гольмия $\text{HoBr}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и $\text{HoCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, синтезированные из карбоната гольмия по реакции с концентрированными бромоводородной и хлороводородной кислотой (обе квалификации «чда»), соответственно; растворы кислот брали в 35–40%-ном избытке. Полученные растворы бромид и хлорида гольмия выпаривали при нагревании до начала выделения кристаллов, охлаждали, отделяли кристаллы от маточного раствора вакуумным фильтрованием на пористом стеклянном фильтре и выдерживали в эксикаторе над гидроксидом натрия до постоянной массы. Содержание гольмия в кристаллогидратах соответствующих галогенидов контролировали трилонометрически [12] (найдено 31.9%, вычислено для $\text{HoBr}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 32.15%; найдено 43.5%, вычислено для $\text{HoCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 43.46%). Карбамид для синтеза – марки «осч 3–3».

Синтез комплексных соединений вели, смешивая $\text{HoBr}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (или $\text{HoCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) и $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ в молярных соотношениях 1 : 4 и 1 : 6 (без добавления воды). Взаимодействие соли гольмия с карбамидом ведет к растворению реагентов в выделяющейся в результате реакции кристаллизационной воде. При этом обра-

зуются прозрачные растворы, из которых после выдерживания в течение 10–20 суток выпадают бесцветные призматические кристаллы. Полученные кристаллы гигроскопичны и расплываются во влажном воздухе, хотя длительное выдерживание их в эксикаторе над оксидом фосфора(V), очевидно, приводит к частичному выветриванию.

Содержание гольмия в полученных комплексах находили методом трилонометрического титрования; углерод, водород и азот определяли на элементном анализаторе CHNS Flash EA1112 фирмы Thermo Finnigan (Италия). Ошибка определения C, H, N составляла 0.2 – 0.3%. Состав полученных производных бромид гольмия отвечает формулам $\text{HoBr}_3 \cdot 4\text{Ur} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ и $\text{HoBr}_3 \cdot 6\text{Ur} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, что соответствует соотношению исходных веществ при синтезе. В случае хлорида гольмия при любом соотношении исходных веществ получается соединение одного и того же состава, оно не содержит воды и отвечает формуле $\text{HoCl}_3 \cdot 4\text{Ur}$ (табл. 1). Небольшие отклонения содержания анализируемых элементов от теоретического значения могут быть связаны, с одной стороны, с гигроскопичностью комплексов, с другой – с постепенным обезвоживанием препаратов при хранении над осушителем.

Таблица 1. Результаты элементного анализа комплексов I–III.

Соединение	Содержание (найдено/вычислено), %				Молярное отношение Ho : Ur
	C	H	N	Ho	
I	6.70/6.90	3.35/3.25	15.6/15.68	23.0/23.56	1 : 4.02
II	8.99/9.12	3.50/3.22	21.0/20.17	20.6/19.94	1 : 5.96
III	9.39/8.81	3.13/3.94	21.9/19.72	32.2/30.08	1 : 4.02

ИК спектры синтезированных комплексов записывали на ИК-Фурье спектрометре EQUINOX 55, «BRUKER», Германия. Экспериментальные интенсивности дифракционных отражений получали при комнатной температуре на дифрактометре CAD-4 [13] (AgK_α -излучение, графитовый монохроматор, ω/θ -сканирование). Параметры элементарной ячейки определяли и уточняли по 25 рефлексам в интервале углов θ 12°–13° (I) или 11°–12° (II, III). Поправка на поглощение сделана методом Ψ -сканирования отдельных рефлексов. Первичную обработку массива экспериментальных данных проводили по комплексу программ WinGX [14]. Все последующие расчеты выполняли в рамках комплекса программ SHELX 97 [15]. Кристаллическую структуру определяли прямыми методами с последующим уточнением позиционных и тепловых параметров в анизотропном приближении для всех неводородных атомов. Атомы водорода были введены в вычисленные позиции и участвовали в уточнении методом «наездника». Рис. 1–4 получены с помощью программы Mercury [16].

Координаты атомов и другие параметры кристаллической структуры синтезированных данных:

№ 852915 (I), 852916 (II) и 852917 (III),

<http://www.ccdc.cam.ac.uk>;

e-mail: data_request@ccdc.cam.ac.uk.

Результаты и их обсуждение

В табл. 2 приведены результаты спектрального исследования синтезированных комплексных соединений гольмия.

Наблюдаемую в спектрах I–III полосу поглощения при 1578–1586 cm^{-1} , очевидно, следует интерпретировать как смещенную полосу 1625 cm^{-1} , включающую валентные колебания связей CO и деформационные колебания NH_2 -группы. Такое смещение полосы поглощения может быть вызвано ослаблением связи CO в результате координирования карбамида атомом лантаноида. В то же время наблюдается смещение максимумов полос поглощения CN (1064 cm^{-1}) в сторону более низких частот (1013–1022 cm^{-1}), что подтверждает наличие связей карбамида с комплексообразователем через атом кислорода. В случае соединения III в ИК спектре отсутствует полоса поглощения в области 1650–1660 cm^{-1} , включающая деформационные колебания воды, что служит подтверждением состава этого безводного комплекса.

Кристаллографические характеристики синтезированных соединений представлены в табл. 3.

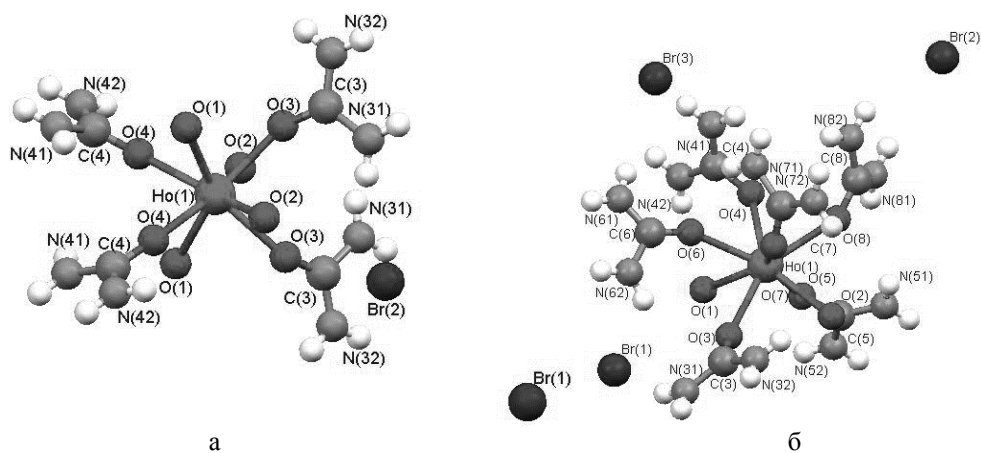


Рис. 1. Структура комплексных соединений **I** (а) и **II** (б). Атомы водорода координированных молекул воды не показаны.

Значения некоторых длин связей в **I** (d , Å):

Ho(1)–O(1) = 2.396(4); Ho(1)–O(2) = 2.393(4); Ho(1)–O(3) = 2.293(4); Ho(1)–O(4) = 2.268(4)

Значения некоторых длин связей в **II** (d , Å):

Ho(1)–O(1) = 2.455(4); Ho(1)–O(2) = 2.449(3); Ho(1)–O(3) = 2.311(3); Ho(1)–O(4) = 2.345(4);
Ho(1)–O(5) = 2.267(4); Ho(1)–O(6) = 2.322(4); Ho(1)–O(7) = 2.328(4); Ho(1)–O(8) = 2.317(4)

Значения некоторых двугранных углов в **II** (ϕ , град):

N(42)–[C(4)–O(4)]–N(41) = 178.69; N(52)–[C(5)–O(5)]–N(51) = 178.01;
N(81)–[C(8)–O(8)]–N(82) = 158.60; N(31)–[C(3)–O(3)]–N(32) = 178.90;
N(62)–[C(6)–O(6)]–N(61) = 157.22; N(72)–[C(7)–O(7)]–N(71) = 178.68

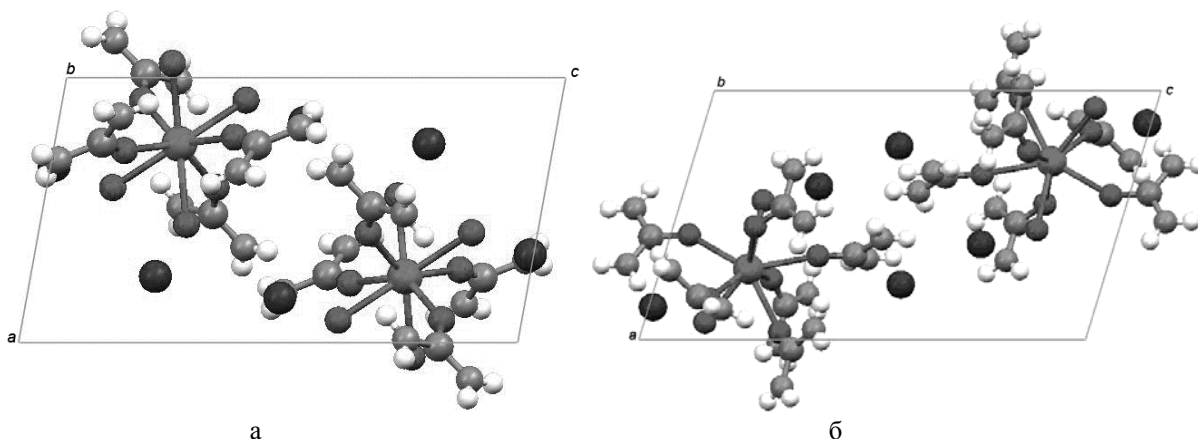


Рис. 2. Элементарные ячейки соединений **I** (а) и **II** (б) (проекция вдоль оси b).

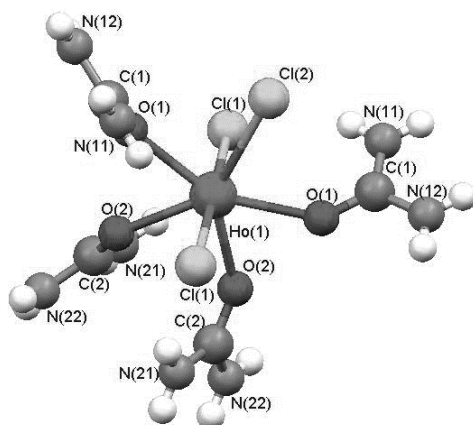


Рис. 3. Структура соединения **III**. Атомы водорода координированных молекул воды не показаны.

Значения некоторых длин связей (d , Å):

Ho(1)–O(1) = 2.308(3); Ho(1)–O(2) = 2.332(3);

Ho(1)–Cl(1) 2.626(2); Ho(1)–Cl(2) 2.7725(19)

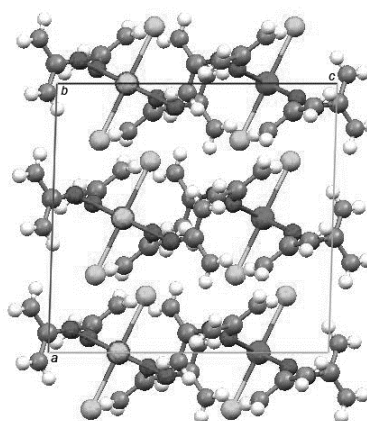


Рис. 4. Элементарная ячейка соединения **III** (проекция вдоль оси b).

Таблица 2. Частоты максимумов основных полос поглощения в ИК спектрах карбамида и комплексных соединений I–III, см⁻¹.

Карбамид	I	II	III	Отнесение полос
559	529	523	540	
573	573	578	600	
789	771	776	773	$\delta(\text{NCN})$
1064	1020	1013	1022	$\nu_s(\text{CN})$
1153	1146	1153	1155	$\rho(\text{NH}_2)$
1625	1586	1578	1586	$\delta(\text{NH}_2) + \nu(\text{CO})$
1680	1656	1652		$\nu(\text{CO}) + \delta(\text{NH}_2) + \delta(\text{HOH})$
3259				
3345	3390	3319	3353	
3440	3451	3434	3453	$\nu(\text{OH}) + \nu(\text{NH})$

Таблица 3. Кристаллографические характеристики, детали рентгендифракционного эксперимента и уточнения структуры комплексов I–III.

Параметр	Значение		
	I	II	III
Эмпирическая формула	C ₄ H ₂₄ Br ₃ Ho N ₈ O ₈	C ₆ H ₂₈ Br ₃ Ho N ₁₂ O ₈	C ₄ H ₁₆ Cl ₃ Ho N ₈ O ₄
Молекулярная масса	716.97	801.06	511.53
Сингония	Моноклинная	Триклинная	Моноклинная
Пр. гр.	<i>P</i> 2/ <i>n</i>	<i>P</i> $\bar{1}$	<i>C</i> 2/ <i>c</i>
<i>a</i> , Å	7.509(4)	8.814(4)	11.205(7)
<i>b</i> , Å	10.1132(18)	10.447(4)	12.322(6)
<i>c</i> , Å	13.898(4)	14.632(5)	11.650(6)
α , град	90.00	96.66(3)	90.00
β , град	100.27(3)	104.23(3)	91.82(8)
γ , град	90.00	105.84(3)	90.00
<i>V</i> , Å ³	1038.5(6)	1231.9(8)	1607.8(15)
<i>Z</i>	2	2	4
ρ выч., г/см ³	2.293	2.160	2.113
μ , мм ⁻¹	5.149	4.351	2.893
Область углов θ , град.	1.59–21.97	1.16–19.49	1.94–21.97
Область индексов	$10 \leq h \leq 9, 0 \leq k \leq 13, 0 \leq l \leq 18$	$-10 \leq h \leq 10, -12 \leq k \leq 12, 0 \leq l \leq 17$	$-14 \leq h \leq 14, 0 \leq k \leq 16, 0 \leq l \leq 15$
Независимых отражений	2583	4347	1994
Число отражений с $I \geq 2\sigma(I)$	2203	3866	1786
Число уточняемых параметров	110	271	92
GOOF	1.042	1.027	1.024
<i>R</i> -фактор [$I \geq 2\sigma(I)$]	0.0349/0.0802	0.0289/0.0687	0.0260/0.0618
R_1/wR_2			
$\Delta\rho_{\max}/\Delta\rho_{\min}$, e/Å ³	1.402/-1.108	1.324/-0.535	0.710/-0.967

В кристаллах I и II присутствуют комплексные катионы $[\text{Ho}(\text{Ur})_4(\text{H}_2\text{O})_4]^{3+}$ и $[\text{Ho}(\text{Ur})_6(\text{H}_2\text{O})_2]^{3+}$, соответственно. Координационный полиэдр – искаженная тетрагональная антипризма, КЧ комплексобразователя равно 8. Карбамид координируется через атом кислорода, бромид-ионы не входят во внутреннюю сферу комплекса. В случае соединения I координация не приводит к изменению плоского строения четырех молекул карбамида (рис. 1, а). В случае соединения II (рис. 1, б) две из шести координированных молекул карбамида искажаются и приобретают двугранный угол N–C(O)–N, не равный 180° (а

именно: 157.2° и 158.6°). Очевидно, это явление обусловлено пространственными затруднениями размещения большего числа карбамидных лигандов в окружении центрального атома. В случае аналогичных комплексов эрбия и лютеция также искажается плоское строение двух (из шести) координированных молекул карбамида [10], а для аналогичного комплекса лантана – только одной молекулы Ur [8]. Вероятно, причина этого различия в том, что размеры атомов Ho, Er и Lu существенно меньше, чем атома La [17].

В кристаллах I и II имеются протяженные полости, в которых располагаются колонки из

бромид-ионов (в случае **II** полости более широкие и включают двойные колонки бромид-ионов) (рис. 2). В полученных комплексах существует развитая система водородных связей. Судя по тому, что длины связей гольмий – кислород карбамида несколько ниже, чем длины связей РЗЭ – кислород воды, молекулы Ug связаны с комплексообразователем прочнее, чем молекулы H_2O .

В кристаллах **III** (рис. 3) присутствуют нейтральные комплексы состава $[\text{Ho}(\text{Ur})_4\text{Cl}_3]$. КЧ комплексообразователя равно 7, а координационный полиэдр – искаженная пентагональная бипирамида. Интересно, что такая же форма координационного полиэдра была обнаружена нами и в случае карбамидного комплекса хлорида эрбия $[\text{Er}(\text{Ur})_6\text{Cl}]\text{Cl}_2$, где координирован только один из трех хлорид-ионов [8] и ацетамидного комплекса $[\text{Y}(\text{AA})_5(\text{H}_2\text{O})_2]\text{Cl}_3$, где координация хлорид-ионов отсутствует [9]. В то же время в комплексе состава $[\text{La}(\text{Ur})_6\text{Cl}_2]\text{Cl}$ с центральным атомом существенно большего размера реализуется традиционное для карбамидных производных КЧ, равное 8 (координационный полиэдр – искаженная тетрагональная антипризма) [7].

В структуре $[\text{Er}(\text{Ur})_6\text{Cl}]\text{Cl}_2$ два хлорид-иона не координированы центральным атомом; они образуют двойные колонки, расположенные в обширных протяженных полостях структуры, образованной катионами хлоро(гексакарбамид)-эрбия(III) [8]. Кристаллическая структура карбамидного комплекса хлорида гольмия (**III**) довольно компактна и характеризуется большим количеством внутри- и межмолекулярных водородных связей, в образовании которых участвуют атомы водорода, хлоридные лиганды и карбонильная группа карбамида, при этом образуются система плоских и неплоских шести- и восьми-членных циклов (рис. 4). Координированные молекулы Ug в **III** не искажаются и сохраняют

свое плоское строение, что свидетельствует об отсутствии заметных пространственных затруднений при образовании данного комплекса.

Таким образом, в случае карбамидных производных хлоридов РЗЭ строение обусловлено и размером центрального атома, и специфической склонностью к координации хлорид-ионов во внутренней сфере вместо молекул воды. Для объяснения этого обстоятельства можно воспользоваться выводами эмпирической теории Пирсона [18], согласно которой жесткие кислоты (ионы РЗЭ) не склонны координировать мягкие основания (иодид-ионы) и основания промежуточного типа (бромид-ионы), но достаточно активно связывают хлорид-ионы, которые относятся в числу жестких оснований. Так, если в $[\text{La}(\text{Ur})_6\text{Cl}_2]\text{Cl}$ [7] координировано центральным атомом два хлорид-иона, а в $[\text{Er}(\text{Ur})_6\text{Cl}]\text{Cl}_2$ координирован только один из трех хлорид-ионов [8], то в комплексе гольмия $[\text{Ho}(\text{Ur})_4\text{Cl}_3]$ (**III**) внешняя сфера отсутствует, все три хлорид-иона координированы атомом лантаноида.

Структура карбамидных комплексных соединений иттрия (комплексообразователь меньшего размера, чем атомы лантаноидов) $[\text{Y}(\text{Ur})_4(\text{H}_2\text{O})_4]\text{Cl}_3$ и $[\text{Y}(\text{Ur})_6(\text{H}_2\text{O})_2]\text{Cl}_3$ [9] схожа со структурой комплексных соединений бромидов и иодидов лантанидов (а именно: КЧ=8, координационный полиэдр – искаженная тетрагональная антипризма, галогенид-ионы не координированы и находятся во внешней сфере; пятая и шестая координированные молекулы карбамида подвергаются искажению).

Таким образом, в случае хлоридов РЗЭ (в отличие от бромидов и иодидов) состав и структурные особенности карбамидных комплексов позволяют выявить тонкие различия в ряду этих элементов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сулайманкулов К. Соединения карбамида с неорганическими солями. – Фрунзе: Илим, 1971. 223 с.
2. Дилебаева А., Сулайманкулов К. С. Изучение взаимодействия мочевины с хлоридами празеодима, неодима и самария в водных растворах // Журн. неорг. химии. 1973. Т. 18. С. 2257–2261.
3. Айтимбетов К., Сулайманкулов К.С., Батюк А.Г., Исмаилов М. Системы хлорид эрбия – карбамид – вода и нитрат эрбия – карбамид – вода при 30°C // Журн. неорг. химии. 1975. Т. 20. С. 2510–2515.
4. Дилебаева А., Ногоев К., Сулайманкулов К. Взаимодействие мочевины с хлоридами гадолиния, диспрозия и гольмия // Химия редкоземельных и цветных металлов. – Фрунзе: Илим, 1975. С. 47–51.
5. Дилебаева А., Ногоев К., Сулайманкулов К. Равновесие в водных системах из хлоридов тулия, иттербия и мочевины // Химия редкоземельных и цветных металлов. – Фрунзе: Илим, 1975. С. 52–55.
6. Ашимкулова Г.А., Сулайманкулов К., Турдалиев Ш.Т., Ногоев К. Равновесие в системе хлорид иттрия – мочевины – вода при 30°C // Журн. неорг. химии. 1973. Т. 18. С. 2011–2013.
7. Zhu Zhan-Yang, Zhang Da-Chuan, Lin Zheng-Jiong, Li Pu, Zhong Ai-Zhen, Wang Ling-Jin, Zhang Cheng-Zeng, Wei Yi, Xu Ying-Ting, Shen Tian-Ji, Guo Ao-Ling, Li Xing-Fu. Dichlorohexakis(urea-O)-lanthanum chloride // Huaxue Xuebao (Chin.) Acta Chim.Sinica. 1989. V. 47. 270–276.

8. Аликберова Л.Ю., Альбов Д.В., Кибальников П.С., Федорова Г.А., Рукк Н.С. Синтез и строение комплексных соединений галогенидов иттрия, лантана и эрбия с карбамидом // Коорд. химия. 2012. Т. 38, № 6, С 460–464.
9. Аликберова Л.Ю., Альбов Д.В., Кибальников П.С., Зайцева М.Г., Кравченко В.В., Федорова Г.А., Рукк Н.С. О комплексных соединениях хлорида иттрия с карбамидом и ацетамидом. // Коорд. химия. 2012. Т. 38, №4. С. 251 – 255.
10. Аликберова Л.Ю., Альбов Д.В., Кибальников П.С., Зайцева М.Г., Кравченко В.В., Федорова Г.А., Рукк Н.С. Синтез и строение комплексных соединений бромидов эрбия и лютеция с карбамидом // Коорд. химия. 2011. Т. 37. № 8. С. 635–640.
11. Голубев Д.В., Альбов Д.В., Кравченко В.В., Аликберова Л.Ю., Рукк Н.С. Структурные особенности кристаллических комплексов иодидов некоторых редкоземельных элементов с карбамидом и ацетамидом // Коорд. химия. 2010. Т. 36. № 11. С. 820–827.
12. Patrovsky V. Komplexometrische titrationen (chelatometrie). XLIV. Yttriumbestimmung im gemische von yttriumerden // Coll. Czech. Chem. Comm. 1959. V. 24. P. 3305–3308.
13. Enraf-Nonius CAD-4 Software. Version 5. 0. Delft (The Netherlands): Enraf-Nonius, 1989.
14. Farrugia L.J. WinGX suite for single crystal small molecule crystallography // J. Appl. Cryst. 1999. V. 32. P. 837–838.
15. Sheldrick G.M. SHELXS 97 and SHELXL 97. Göttingen (Germany): Univ. of Göttingen, 1997.
16. Macrae C.F., Edgington P.R., McCabe P., Pidcock E., Shields G.P., Taylor R., Towler M., van de Streek J. Mercury: Visualization and analysis of crystal structures // J. Appl. Cryst. 2006. V. 39. P. 453–457.
17. Бандуркин Г.Н., Джуринский Б.Ф., Тананаев И.В. Особенности кристаллохимии соединений редкоземельных элементов. – М.: Наука, 1984. 232 с.
18. Горновский А.Д., Садименко А.П., Осипов О.А., Цинцадзе Г.В. Жестко-мягкое взаимодействие в координационной химии. – Ростов н/Д.: Изд-во Ростовск. ун-та, 1986. 272 с.