

ВЛИЯНИЕ СТРОЕНИЯ БИС-КАРБАМОИЛМЕТИЛФОСФИНОКСИДОВ НА ЭКСТРАКЦИЮ РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) ИЗ АЗОТНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ В ПРИСУТСТВИИ ИОННОЙ ЖИДКОСТИ

© 2022 г. А. Н. Туранов^{а,*}, В. К. Карандашев^б, А. Н. Яркевич^в

^а Институт физики твердого тела им. Ю. А. Осипьяна РАН,
142432, Черноголовка Московской обл., ул. Академика Осипьяна, д. 2

^б Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН,
142432, Черноголовка Московской обл., ул. Академика Осипьяна, д. 6

^в Институт физиологически активных веществ РАН,
142432, Черноголовка Московской обл., Северный проезд, д. 1

*e-mail: turanov@issp.ac.ru

Поступила в редакцию 29.01.2021, после доработки 21.02.2021, принята к публикации 25.02.2021

Установлено, что экстракционная способность бис[(дифенилфосфинил)ацетиамидо]алканов, в молекулах которых два бидентатных фрагмента $\text{Ph}_2\text{P}(\text{O})\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{NAlk}$ – объединены через амидный атом азота алкиленовым мостиком, по отношению к ионам РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) в азотнокислых средах значительно увеличивается в присутствии ионной жидкости бис[(трифторметил)сульфонил]имида 1-бутил-3-метилимидазолия в органической фазе и существенно превышает таковую диарил(диалкилкарбамоилметил)фосфиноксидов. Методом сдвига равновесия определена стехиометрия экстрагируемых комплексов РЗЭ(III). Рассмотрено влияние строения экстрагента и концентрации HNO_3 в водной фазе на эффективность перехода ионов РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) в органическую фазу, содержащую ионную жидкость.

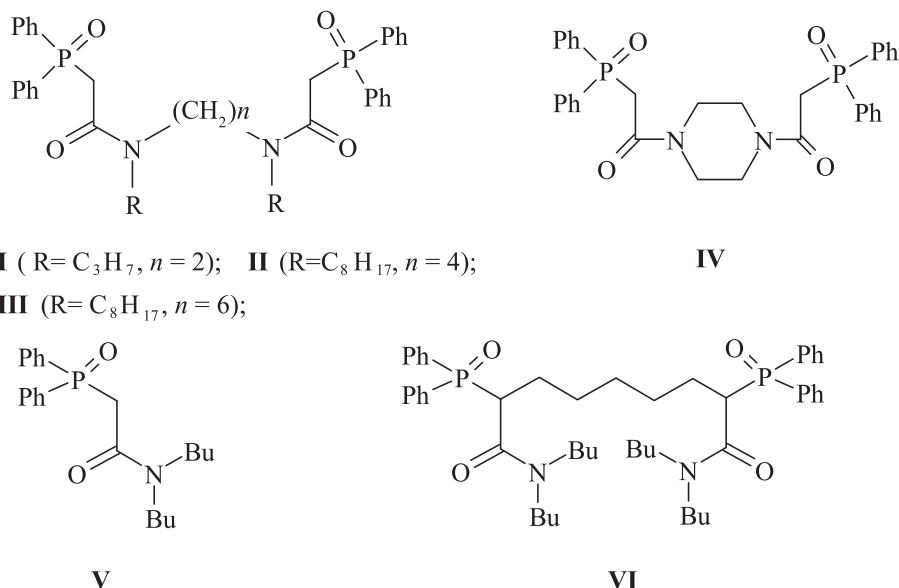
Ключевые слова: экстракция, РЗЭ(III), уран(VI), торий(IV), азотная кислота, карбамоилметилфосфиноксиды, ионные жидкости.

DOI: 10.31857/S0033831122020071, **EDN:** FOLOFA

В процессах переработки отработанного ядерного топлива для извлечения, концентрирования и разделения актинидов и редкоземельных элементов (РЗЭ) широко используются экстракционные методы [1]. Высокой экстракционной способностью по отношению к актинидам и РЗЭ(III) в азотнокислых средах обладают бидентатные нейтральные фосфорорганические соединения, в частности, оксиды диарил(диалкилкарбамоилметил)фосфинов (КМФО) [2, 3]. В последнее время возрос интерес к использованию в экстракционной практике полифункциональных фосфорорганических реагентов [4–7]. Соединения, полученные присоединением нескольких КМФО-групп к пространственно пре-

дорганизованной структурной основе, обладают более высокой экстракционной способностью по отношению к ионам актинидов и РЗЭ(III), чем сами КМФО [8]. Однако широкому использованию таких экстрагентов препятствует сложность их синтеза. Синтетически более доступны соединения с двумя КМФО-фрагментами. Экстракционная способность таких реагентов в значительной мере определяется характером соединения координирующих фрагментов в молекуле экстрагента. Показано, что соединение VI, молекула которого содержит два координирующих карбамоилметилфосфиноксидных фрагмента, соединенных через их метиновые группы пентаметиленовой цепочкой, мало отличается

Схема 1. Структуры экстрагентов



от КМФО V по своей экстракционной способности по отношению к Am(III) [9] и PЗЭ(III) [10] в азотнокислых средах. С другой стороны, объединение в одной молекуле двух бидентатных фрагментов Ph₂P(O)CH₂C(O)NH– через амидный атом азота ди- или триэтиленгликолевой цепочкой, а также алкиленовым или ариленовым мостиком [11, 12] приводит к значительному увеличению экстракционной способности таких соединений по отношению к U(VI), Th(IV) и PЗЭ(III) в азотнокислых средах.

В последнее время наметилась тенденция использования ионных жидкостей (ИЖ) в качестве несмешивающейся с водой фазы при экстракции ионов металлов [13–18]. Было показано, что ионы актинидов и PЗЭ(III) экстрагируются растворами КМФО в ИЖ – гексафторфосфатах и бис[(трифторметил)сульфонил]имиды метилалкилимидазолия – значительно более эффективно, чем растворами КМФО в молекулярных растворителях [19]. Кроме того, для эффективного извлечения PЗЭ(III) и Am(III) из растворов HNO₃ или HCl достаточно даже относительно небольшой концентрации ИЖ в органическом растворителе, содержащем КМФО V [20–22].

Сведения об экстракции ионов PЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) из азотнокислых растворов соединениями, содержащими два КМФО-фрагмента, в при-

сутствии ИЖ в органической фазе ограничены [10, 23].

Цель данной работы – исследование влияния строения реагентов, в молекуле которых содержится два КМФО-фрагмента, на их экстракционную способность по отношению к PЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) в азотнокислых средах в присутствии ИЖ в органической фазе. Для этого исследовано межфазное распределение PЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) между растворами HNO₃ и органической фазой, содержащей ИЖ бис[(трифторметил)сульфонил]имид 1-бутил-3-метилимидазолия (C₄mimTf₂N) и соединения I–III, отличающиеся длиной алкиленового мостика между координирующими фрагментами, а также соединение IV с пиперазиновым кольцом между фрагментами КМФО. Для сравнения приведены данные по экстракции ионов PЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) монофосфорильным КМФО – дибутил(дифенилфосфинил)ацетамидом V – в сопоставимых условиях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез соединений I–IV [24] и V [25] описан в предыдущих работах. Ионную жидкость бис[(трифторметил)сульфонил]имид 1-бутил-3-метилимидазолия (C₄mimTf₂N) (Merck) и литиевую соль бис[(трифторметил)сульфонил]имиды (LiTf₂N) (Sigma–Aldrich) использовали без дополнительной

очистки. В качестве органического растворителя применяли 1,2-дихлорэтан марки х.ч.

Методика проведения экстракции РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) в системах с ИЖ описана в предыдущих работах [10–12]. Исходная концентрация каждого из РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) составляла 2×10^{-6} моль/л, концентрация азотной кислоты в водной фазе варьировалась в интервале 0.3–5.0 моль/л.

Содержание РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) в исходных и равновесных водных растворах определяли методом масс-спектрометрии с ионизацией пробы в индуктивно связанной плазме с использованием масс-спектрометра X-7 (Thermo Electron, США). Содержание ионов металлов в органической фазе определяли после их реэкстракции раствором 0.1 моль/л 1-гидроксиэтан-1,1-дифосфоновой кислоты. Коэффициенты распределения (D) рассчитывали как отношение концентраций ионов металлов в равновесных органической и водной фазах. Погрешность определения коэффициентов распределения не превышала 5%. Концентрацию HNO_3 в равновесных водных фазах определяли потенциометрическим титрованием раствором NaOH .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Ранее было показано, что растворы $\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}$ в дихлорэтано практически не экстрагируют РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) из азотнокислых растворов (величины D не превышают 10^{-2}) [20]. Однако в присутствии $\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}$ в органической фазе эффективность экстракции РЗЭ(III) соединением II значительно увеличивается (рис. 1). При этом величина синергетического эффекта $S = D/D_{(0)}$ (где D и $D_{(0)}$ – коэффициенты распределения в присутствии и в отсутствие ИЖ в органической фазе) в случае экстракции Eu(III) $S_{\text{Eu}} = 65$. Можно предположить, что синергетический эффект в экстракционной системе $\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}$ –II–дихлорэтан//РЗЭ(III)– HNO_3 связан с входением гидрофобных анионов Tf_2N^- в состав экстрагируемых комплексов, что приводит к увеличению их гидрофобности по сравнению с сольватированными нитратами РЗЭ(III), экстрагируемыми растворами соединения II в дихлорэтано. По этой же причине происходит значительное повышение эффективности экстракции РЗЭ(III) и Am(III) из азотнокислых

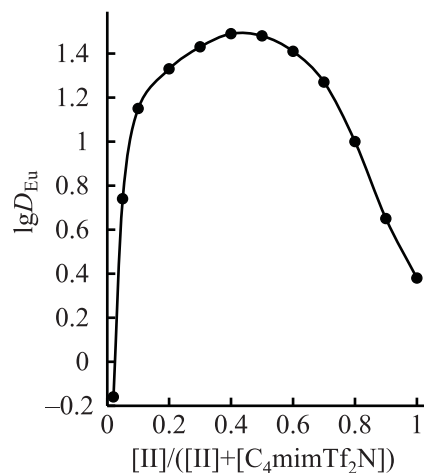


Рис. 1. Зависимость коэффициентов распределения Eu(III) от исходного соотношения концентраций соединения II и $\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}$ в органической фазе при экстракции из раствора 3 моль/л HNO_3 изомольными смесями соединения II и $\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}$ в дихлорэтано. $[II] + [\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}] = 0.01$ моль/л.

растворов растворами КМФО в инертных растворителях в присутствии гидрофобных пикрат- [26] и Tf_2N^- [27] анионов в водной фазе или аниона хлорированного дикарболлида кобальта [28] в органической фазе.

Для сравнения экстракционной способности соединений I–V по отношению к РЗЭ(III) на рис. 2 представлены значения D_{Ln} при экстракции ионов РЗЭ(III) из раствора 3 моль/л HNO_3 растворами этих соединений в дихлорэтано, содержащем $\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}$, при одинаковой концентрации КМФО групп в органической фазе.

Можно видеть, что характер объединения двух координирующих фрагментов в молекуле соединений I–IV существенно влияет на эффективность экстракции РЗЭ(III). Экстракционная способность бис-КМФО IV, в молекуле которого координирующие карбамоильные группы заблокированы жестким пиперазиновым фрагментом, значительно снижается по сравнению с его моноаналогом V. Соединения I–III экстрагируют РЗЭ(III) более эффективно, чем их моноаналог V. Одной из причин этого может быть участие дополнительной координирующей группы в комплексообразовании с ионами Ln^{3+} . Однако для подтверждения этого предположения требуется проведение структурных исследований экстрагируемых комплексов. Зависимость D_{Ln} от числа метиленовых групп (n) в алкиленовом

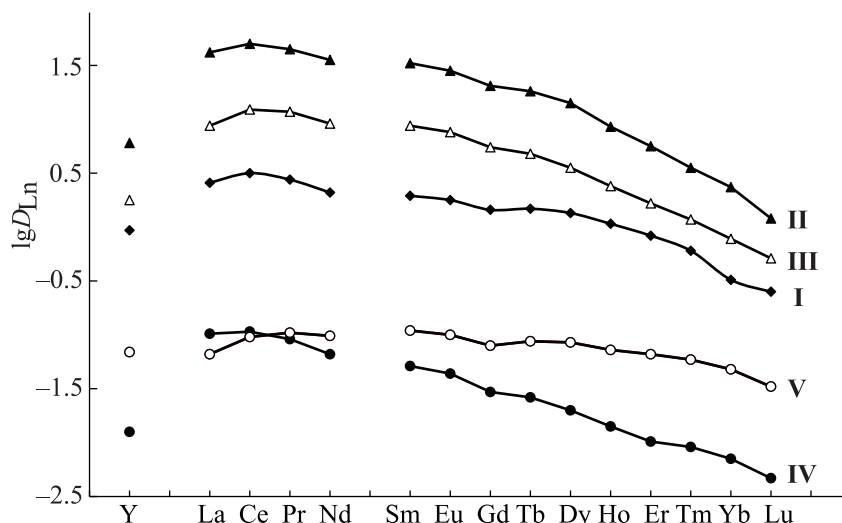


Рис. 2. Коэффициенты распределения РЗЭ(III) и Y(III) при экстракции из раствора 3 моль/л HNO_3 растворами 0.002 моль/л соединений I–IV и 0.004 моль/л КМФО V в дихлорэтано, содержащем 0.01 моль/л $\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}$.

мостике между двумя координирующими группами $\text{Ph}_2\text{P}(\text{O})\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{NAlk}$ носит немонотонный характер. Наибольшие значения D_{Ln} наблюдаются при $n = 4$ (соединение II). Вероятно, на эффективность экстракции этими соединениями некоторое влияние оказывают также стерические факторы,

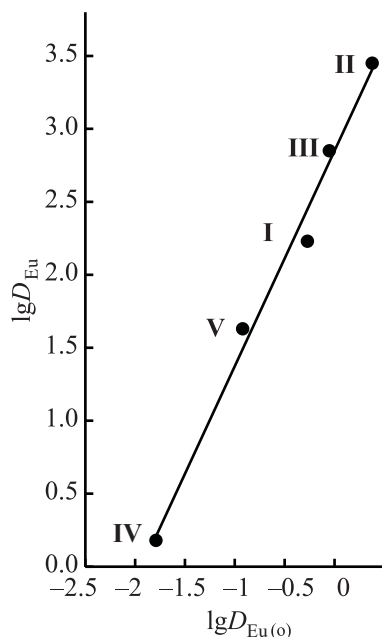


Рис. 3. Соотношение между значениями D_{Eu} при экстракции Eu(III) из растворов 3 моль/л HNO_3 растворами 0.01 моль/л соединений I–IV и 0.02 моль/л КМФО V в дихлорэтано, содержащем 0.1 моль/л $\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}$, и значениями коэффициентов распределения $D_{\text{Eu}(0)}$ при экстракции Eu(III) растворами тех же экстрагентов в дихлорэтано в отсутствие ИЖ.

связанные с размером алкильного радикала R при атоме азота. Уменьшение длины алкиленового мостика в молекуле соединения I сопровождается снижением D_{Ln} (рис. 2). Это может быть связано как с наличием стерических препятствий для комплексообразования с участием связанных через атом азота карбамоильных фрагментов, так и со снижением донорной способности координирующих групп экстрагента I вследствие действия индукционного эффекта. С увеличением n от 2 до 4 это действие ослабляется, и величина D_{Ln} возрастает. Снижение D_{Ln} при увеличении n от 4 до 6 может быть связано с увеличением расстояния между координирующими центрами молекулы соединения III, что препятствует полидентатной координации с ионом металла.

Ранее было показано, что бис-КМФО VI, в молекуле которого объединение двух координиру-

Таблица 1. Коэффициенты распределения U(VI) и Th(IV) при их экстракции из раствора 3 моль/л HNO_3 растворами 0.001 моль/л соединений I–IV и 0.002 моль/л соединения V в дихлорэтано ($D_{(0)}$) и в дихлорэтано, содержащем 0.01 моль/л $\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}$ (D)

Экстрагент	$\lg D_{\text{Th}(0)}$	$\lg D_{\text{Th}}$	$\lg D_{\text{U}(0)}$	$\lg D_{\text{U}}$
I ($n = 2$)	0.15 [12]	1.40	0.41 [12]	1.48
II ($n = 4$)	2.18 [12]	3.82	0.95 [12]	2.61
III ($n = 6$)	1.74 [12]	3.38	0.55 [12]	1.95
IV	-1.30 [12]	0.40	-1.38 [12]	-0.32
V	1.70	2.08	0.32	0.94

щих групп $\text{Ph}_2\text{P}(\text{O})\text{CHC}(\text{O})\text{NBU}_2$ осуществляется через их метиновые группы пентаметиленовой цепочкой, экстрагирует ионы РЗЭ(III) в присутствии $\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}$ в органической фазе из растворов 3 моль/л HNO_3 менее эффективно, чем его моноаналог V [10].

Зависимости экстракционной способности соединений I–V от их строения при экстракции U(VI) и Th(IV) из азотнокислых растворов при равных концентрациях карбаоилметилфосфиноксидных групп в экстрагирующих растворах представлены в табл. 1. Следует отметить, что в присутствии ИЖ бис-КМФО I–III более эффективно экстрагируют U(VI) и Th(IV) по сравнению с моноаналогом V.

Сопоставление величин D_{Ln} при экстракции РЗЭ(III) из азотнокислых растворов в системе (соединения I–V)– $\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}$ и величинами $D_{\text{Ln}(0)}$ при экстракции этими соединениями в дихлорэтаноле показало, что наблюдается линейная корреляция между этими величинами (рис. 3). Можно видеть, что характер объединения двух координирующих фрагментов в молекуле экстрагентов оказывает значительно более заметное влияние на эффективность экстракции РЗЭ(III) в системе с $\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}$, чем в отсутствие ИЖ в органической фазе, а величина синергетического эффекта увеличивается в ряду IV < V < I < III < II (рис. 3).

Присутствие $\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}$ в органической фазе существенно изменяет характер зависимости коэффициентов распределения ионов металлов от концентрации HNO_3 в равновесной водной фазе при экстракции растворами соединения II (рис. 4). В отсутствие ИЖ величины D возрастают с ростом $[\text{HNO}_3]$, тогда как в присутствии ИЖ наблюдается снижение D с ростом $[\text{HNO}_3]$, которое отмечалось ранее и при экстракции растворами КМФО и других нейтральных экстрагентов в присутствии ИЖ [20, 23]. Это может быть связано с соэкстракцией как HNO_3 , так и HTf_2N , присутствующей в водной фазе вследствие заметного перехода ионов Tf_2N^- из органической фазы в водную [29], приводящей к снижению концентрации свободного экстрагента в равновесной органической фазе. С ростом $[\text{HNO}_3]$ величина синергетического эффекта уменьшается, однако синергизм наблюдается даже в сильноокислых средах (рис. 4). При экстракции из раствора 3 моль/л HNO_3 величины S увеличиваются в ряду РЗЭ(III) от 288 для La до 1420 для Lu (рис. S1) по

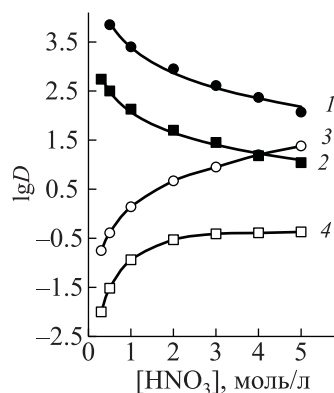


Рис. 4. Зависимость коэффициентов распределения U(VI) (1, 3) и Eu(III) (2, 4) от концентрации HNO_3 в водной фазе при экстракции растворами 0.001 (1, 3) и 0.002 (2, 4) моль/л соединения II в дихлорэтаноле и в дихлорэтаноле, содержащем 0.01 моль/л $\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}$ (1, 2).

мере уменьшения ионных радиусов ионов Ln^{3+} и увеличения их энергии гидратации. По-видимому, замещение в экстрагируемом комплексе анионов NO_3^- на более гидрофобные Tf_2N^- оказывает большее влияние на экстракцию более гидратированных ионов РЗЭ. Это приводит к снижению фактора разделения La/Lu ($\beta_{\text{La/Lu}} = D_{\text{La}}/D_{\text{Lu}}$) от 32.3 при экстракции раствором соединения II в дихлорэтаноле до 7.4 при экстракции этим экстрагентом в присутствии $\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}$ в органической фазе (рис. S1).

Увеличение концентрации $\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}$ в органической фазе сопровождается увеличением D_{Ln} , D_{U} и D_{Th} (рис. S2). В области относительно низкой концентрации ИЖ угловой наклон зависимости $\lg D_{\text{Ln}} - \lg[\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}]$ близок к 2, что соответствует переходу РЗЭ(III) в органическую фазу в виде комплексов $\text{M}^{n+}\text{L}_s(\text{NO}_3)_{n-2}(\text{Tf}_2\text{N})_2$ (s – сольватное число).

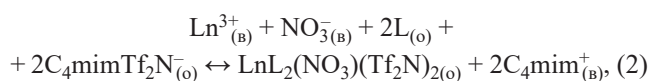
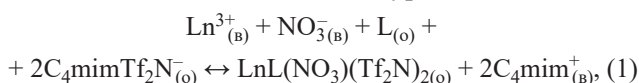
Стехиометрические соотношения M^{n+} : лиганд II в комплексах, экстрагируемых в присутствии ИЖ из растворов 3 моль/л HNO_3 , определено методом сдвига равновесия. При экстракции U(VI) и Th(IV) тангенс угла наклона зависимостей $\lg D - \lg[\text{II}]$ близок к 2 (рис. S3), что соответствует переходу этих ионов в органическую фазу, содержащую ИЖ, в виде дисольватов. Ранее было показано, что в отсутствие ИЖ соединение II экстрагирует U(VI) в виде моносольвата [12]. Увеличение сольватного числа в комплексах, экстрагируемых в системе с ИЖ, может быть связано со слабой координацион-

Таблица 2. Концентрационные константы экстракции РЗЭ(III) из растворов LiTf₂N растворами соединения II и КМФО V в дихлорэтане

Ln(III)	lg K _{Ln,1} (II)	lg K _{Ln,2} (II)	lg K _{Ln,3} (V) [27]
La	16.33 ± 0.03	19.87 ± 0.03	16.70 ± 0.03
Ce	16.43 ± 0.03	19.97 ± 0.03	17.05 ± 0.03
Pr	16.45 ± 0.03	19.99 ± 0.03	17.19 ± 0.03
Nd	16.38 ± 0.04	19.92 ± 0.04	17.16 ± 0.03
Sm	16.42 ± 0.04	19.96 ± 0.04	17.24 ± 0.03
Eu	16.26 ± 0.03	19.86 ± 0.03	17.14 ± 0.03
Gd	16.09 ± 0.05	19.63 ± 0.05	16.83 ± 0.03
Tb	15.89 ± 0.03	19.43 ± 0.03	16.61 ± 0.03
Dy	15.60 ± 0.04	19.14 ± 0.04	16.32 ± 0.03
Ho	15.29 ± 0.03	18.89 ± 0.03	15.96 ± 0.03
Er	15.06 ± 0.04	18.60 ± 0.04	15.61 ± 0.03
Tm	14.77 ± 0.03	18.37 ± 0.03	15.30 ± 0.03
Yb	14.60 ± 0.04	18.14 ± 0.04	15.04 ± 0.03
Lu	14.37 ± 0.03	17.91 ± 0.03	14.84 ± 0.03

ной способностью анионов Tf₂N⁻ [30]. Эти анионы находятся, по-видимому, во внешней координационной сфере экстрагируемого комплекса, тогда как в отсутствие ИЖ ионы U(VI) экстрагируются соединением II в виде координационно-сольватированных нитратов, в которых ионы NO₃⁻ участвуют в координации ионов UO₂²⁺.

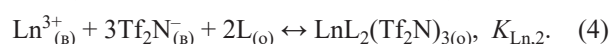
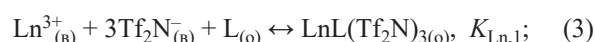
Тангенс угла наклона зависимостей lgD_{Ln}-lg[II] равен 1.59 ± 0.15 (рис. S3), что указывает на экстракцию ионов РЗЭ(III) из азотнокислых растворов соединением II в присутствии ИЖ в виде смеси моно- и дисольватов. В аналогичных условиях КМФО V экстрагирует ионы РЗЭ(III) в виде ди- и трисольватов [20]. Уменьшение сольватного числа в комплексах, экстрагируемых в системе бис-КМФО II-C₄mimTf₂N, может быть связано с увеличением дентатности лиганда II при комплексообразовании с ионами РЗЭ(III). Процесс экстракции ионов РЗЭ(III) из азотнокислых растворов растворами бис-КМФО II (L) в присутствии ИЖ может быть описан уравнениями



где символы (в) и (о) относятся к компонентам водной и органической фаз соответственно.

Ранее было показано, что эффективность экстракции ионов РЗЭ(III) и Am(III) растворами нейтральных экстрагентов в присутствии ИЖ, содержащих анион Tf₂N⁻, определяется устойчивостью комплекса LnL_s(Tf₂N)₃ при его экстракции органическим растворителем [31].

Для определения констант экстракции РЗЭ(III) растворами соединения II в дихлорэтане из растворов, содержащих ионы Tf₂N⁻, рассмотрена зависимость D_{Ln} от концентрации ионов Tf₂N⁻ в водной фазе при постоянной концентрации II в органической фазе. Тангенс угла наклона зависимости lgD_{Ln}-lg[Tf₂N⁻] близок к 3 для всех РЗЭ(III), что соответствует экстракции РЗЭ(III) в виде комплексов со стехиометрическим соотношением Ln : Tf₂N⁻ = 1 : 3. При постоянной концентрации ионов Tf₂N⁻ в водной фазе тангенс угла наклона зависимостей lgD_{Ln}-lg[II] равен 1.40 ± 0.13 (рис. S4), что указывает на переход ионов РЗЭ(III) в органическую фазу в виде комплексов со стехиометрическими соотношениями РЗЭ(III) : II = 1 : 1 и 1 : 2. В аналогичных условиях КМФО V экстрагирует ионы РЗЭ(III) в виде трисольватов [27]. Процесс экстракции ионов РЗЭ(III) из водных растворов, содержащих анионы Tf₂N⁻, растворами бис-КМФО II (L) в дихлорэтане может быть описан уравнениями



Константы экстракции РЗЭ(III) соединением II из водных растворов, содержащих ионы Tf₂N⁻ (K_{Ln,1} и K_{Ln,2}), рассчитанные по уравнению

$$D_{\text{Ln}} = [\text{Tf}_2\text{N}^-]_{(в)}^3 (K_{\text{Ln},1}[\text{L}]_{(о)} + K_{\text{Ln},2}[\text{L}]_{(о)}^2), \quad (5)$$

где [L]_(о) – равновесная концентрация экстрагента в органической фазе, представлены в табл. 2. Для сравнения приведены константы экстракции комплексов LnL₃(Tf₂N)₃, экстрагируемых растворами КМФО V [27]. Из этих данных видно, что устойчивость комплексов LnL₂(Tf₂N)₃ для соединения II превышает таковую для комплексов LnL₃(Tf₂N)₃, экстрагируемых растворами КМФО V. С учетом различия в стехиометрии комплексов РЗЭ(III) с этими лигандами величины D_{Ln} при экстракции РЗЭ(III) раствором соединения II в дихлорэтане из раствора LiTf₂N более чем на два порядка превышают величины D_{Ln} в системе с КМФО V при такой же концентрации экстрагента. Этим объясняются бо-

лее высокие значения D_{Ln} при экстракции РЗЭ(III) из растворов HNO_3 в системе с соединением II по сравнению с КМФО V (рис. 2).

Представленные данные показали, что в условиях равной концентрации карбамоилметилфосфиноксидных групп в экстрагирующем растворе эффективность экстракции РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) из азотнокислых растворов растворами бис-КМФО I–III, молекулы которых содержат два бидентатных фрагмента $Ph_2P(O)CH_2C(O)Nalk-$, соединенных через амидный атом азота алкиленовым мостиком, значительно увеличивается в присутствии ионной жидкости бис[(трифторметил)сульфонил]имида 1-бутил-3-метилимидазолия в органической фазе по сравнению с моно-КМФО V. Зависимость D_{Ln} от числа метиленовых групп (n) в алкиленовом мостике между двумя координирующими группами $Ph_2P(O)CH_2C(O)N(R)$ носит немонотонный характер. Максимальные значения D_{Ln} наблюдаются при $n = 4$ (соединение II).

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках Государственного задания 2020 г. ИФТТ РАН, ИПТМ РАН и ИФАВ РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Дополнительные материалы для этой статьи доступны по doi 10.31857/S0033831122020071 для авторизированных пользователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Myasoevov B.F., Kalmykov S.N.* // *Mendeleev Commun.* 2015. Vol. 25, N 5. P. 319.
<https://doi.org/10.10016/j.mencom.2015.09.001>
2. *Horwitz E.P., Martin K.A., Diamond H., Kaplan L.* // *Solvent Extr. Ion Exch.* 1986. Vol. 4, N 3. P. 449.
<https://doi.org/10.1080/07366298608917877>
3. *Чмутова М.К., Литвина М.Н., Прибылова Г.А., Иванова Л.А., Смирнов И.В., Шадрин А.Ю., Мясоедов Б.Ф.* // *Радиохимия.* 1999. Т. 41. № 4. С. 331.
4. *Аляпышев М.Ю., Бабаин В.А., Устынюк Ю.А.* // *Успехи химии.* 2016. Т. 85, № 9. С. 943–961; *Alyapyshev M. Yu., Babain V.A., Ustynuk Yu.A.* // *Russ. Chem. Rev.* 2016. Vol. 85, N 9. P. 943.
<https://doi.org/10.1070/RCR4588>
5. *Leoncini A., Huskens J., Verboom W.* // *Chem. Soc. Rev.* 2017. Vol. 46. P. 7229.
<https://doi.org/10.1039/C7CS00574A>
6. *Wilson A.M., Bailey P.J., Tasker P.A.* // *Chem. Soc. Rev.* 2014. Vol. 43. P. 123.
<https://doi.org/10.1039/C3CS60275C>
7. *Bhattacharyya A., Mohapatra P.K.* // *Radiochim. Acta.* 2019. V. 107. P. 931.
8. *Arnand-New F., Bohmer V., Dozol J.F., Gruttner C., Jakobi R.A., Kraft D., Mauprivez O., Rouquette H., Schwing-Weill M.-J., Simon N., Vogt W.* // *J. Chem. Soc. Perkin Trans. 2.* 1996. P. 1175.
<https://doi.org/10.1039/P29960001175>
9. *Кочеткова Н.Е., Коуро О.Э., Нестерова Н.П., Медведь Т.Я., Чмутова М.К., Мясоедов Б.Ф., Кабачник М.И.* // *Радиохимия.* 1986. Т. 28, № 3. С. 338.
10. *Туранов А.Н., Карандашев В.К., Яркевич А.Н.* // *Радиохимия.* 2012. Т. 54, № 5. С. 439; *Turanov, A.N., Karandashev, V.K., Yarkevich, A.N.* // *Radiochemistry.* 2012. Vol. 54, N 5. P. 477.
<https://doi.org/10.1134/S1066362212050104>
11. *Turanov A.N., Karandashev V.K., Sharova E.V., Artyushin O.I., Odinets I.L.* // *Solvent Extr. Ion Exch.* 2010. Vol. 28, N 5. P. 579.
<https://doi.org/10.1080/07366299.2010.499297>
12. *Туранов А.Н., Карандашев В.К., Яркевич А.Н.* // *Радиохимия.* 2021. Т. 63, № 4. С. 364–371.
13. *Riano S., Foltova S.S., Binnemans K.* // *RSC Adv.* 2020. Vol. 10. P. 307.
14. *Raut D.R., Sharma S., Ghosh S.K., Mohapatra P.K.* // *Sep. Sci. Technol.* 2017. Vol. 52. P. 1430.
15. *Khodakarami M., Alagha L.* // *Sep. Purif. Technol.* 2020. Vol. 232. ID 115952.
16. *Murakami S., Matsumiya M., Yamada T., Tsunashima K.* // *Solvent Extr. Ion Exch.* 2016. Vol. 34. P. 172.
17. *Kolarik Z.* // *Solvent Extr. Ion Exch.* 2013. Vol. 31. P. 24.
<https://doi.org/10.1080/07366299.2012.700589>
18. *Iqbal M., Waheed K., Rahat S.B., Mehmood T., Lee M.S.* // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2020. Vol. 325. P. 1.
19. *Nakashima K., Kubota F., Maruyama T., Goto M.* // *Anal. Sci.* 2003. Vol. 19. P. 1097.
<https://doi.org/10.2116/analsci.19.1097>

20. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Яркевич А.Н. // Радиохимия. 2013. Т. 55, № 4. С. 314; Turanov A.N., Karandashev V.K., Yarkevich A.N. // Radiochemistry. 2013. Vol. 55, N 4. P. 382. <https://doi.org/10.1134/S1066362213040073>
21. Прибылова Г.А., Смирнов И.В., Новиков А.П. // Радиохимия. 2012. Т. 54, № 5. С. 435.
22. Pribilova G., Smirnov I., Novikov A. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2012. Vol. 295. P. 83.
23. Turanov A.N., Karandashev V.K., Baulin V.E. // Solvent Extr. Ion Exch. 2012. Vol. 30, N 3. P. 244. <https://doi.org/10.1080/07366299.2011.639248>
24. Яркевич А.Н., Брель В.К., Махаева Г.Ф., Серебрякова О.Г., Болтнева Н.П., Ковалёва Н.В. // ЖОХ. 2015. Т. 85, № 7. С. 1120; Yarkevich A.N., Brel V.K., Makhaeva G.F., Serebryakova O.G., Boltneva N.P., Kovaleva N.V. // Russ. J. Gen. Chem. 2015. Vol. 85, N 7. P. 1644. <https://doi.org/10.1134/S1070363215070129>
25. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Харитонов А.В., Лежнев А.Н., Сафронова З.В., Яркевич А.Н., Цветков Е.Н. // ЖОХ. 1999. Т. 69, № 7. С. 1109; Turanov A.N., Karandashev V.K., Kharitonov A.N., Lezhnev A.N., Safronova Z.V., Yarkevich A.N., Tsvetkov E.N. // Russ. J. Gen. Chem. 1999. Vol. 69, N 7. P. 1068.
26. Naganawa H., Suzuki H., Tachimori S., Nasu A., Sekine T. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2001. Vol. 3. P. 2509.
27. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Яркевич А.Н. // Радиохимия. 2018. Т. 60, № 2. С. 153; Turanov, A.N., Karandashev, V.K., Yarkevich, A.N. // Radiochemistry. 2018. Vol. 60, N 2. P. 170–176. <https://doi.org/10.1134/S1066362218020078>
28. Rais J., Tachimori S. // J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett. 1994. Vol. 188, N 2. P. 157.
29. Gaillard C., Boltoeva M., Billard I., Georg S., Mazan V., Ouadi A., Ternova D., Henning C. // ChemPhysChem. 2015. Vol. 16. P. 2653. <https://doi.org/10.1002/cphc.201500283>
30. Binnemans K. // Chem. Rev. 2007. Vol. 107. P. 2593. <https://doi.org/10.1021/cr050979c>
31. Turanov A.N., Karandashev V.K., Sharova E.V., Genkina G.K., Artyushin O.I., Baimukhanova A. // Radiochim. Acta. 2018. Vol. 106. P. 355.