

## ЭКСТРАКЦИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СОЛЯНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ КАРБАМОИЛМЕТИЛФОСФИНОКСИДАМИ В ПРИСУТСТВИИ ДИНОНИЛНАФТАЛИНСУЛЬФОНАТОВ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ АММОНИЕВЫХ ОСНОВАНИЙ

© 2019 г. А. Н. Туранов<sup>1, \*</sup>, В. К. Карандашев<sup>2, 3</sup>, А. Н. Яркевич<sup>4</sup>, В. А. Хвостиков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт физики твердого тела РАН, ул. Акад. Осипьяна, 2, Черноголовка Московской обл., 142432 Россия

<sup>2</sup>Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, ул. Академика Осипьяна, 6, Черноголовка Московской обл., 142432 Россия

<sup>3</sup>Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”, Ленинский пр-т, 4, Москва, 119991 Россия

<sup>4</sup>Институт физиологически активных веществ РАН, Северный пр-д, 1, Черноголовка Московской обл., 142432 Россия

\*E-mail: turanov@issp.ac.ru

Поступила в редакцию 27.09.2018 г.

После доработки 11.10.2018 г.

Принята к публикации 15.01.2019 г.

Изучено межфазное распределение La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu и Y между водными растворами HCl и растворами карбамоилметилфосфиноксидов в присутствии бинарных экстрагентов – динонилнафталинсульфонатов четвертичных аммониевых оснований. Показано, что эффективность экстракции РЗЭ(III) растворами карбамоилметилфосфиноксидов значительно возрастает в присутствии бинарного экстрагента в органической фазе. Определена стехиометрия экстрагируемых комплексов, рассмотрено влияние природы катиона бинарного экстрагента, органического растворителя, структуры карбамоилметилфосфиноксидов и концентрации HCl в водной фазе на эффективность извлечения РЗЭ(III) в органическую фазу.

**Ключевые слова:** экстракция, синергизм, РЗЭ(III), карбамоилметилфосфиноксиды, динонилнафталинсульфонаты четвертичных аммониевых оснований

DOI: 10.1134/S0044457X19060151

Известно, что бидентатные нейтральные фосфорорганические соединения, в частности диарил(диалкилкарбамоилметил)фосфиноксиды (КМФО), обладают высокой экстракционной способностью по отношению к актинидам и редкоземельным элементам (РЗЭ) в азотнокислых средах и используются для извлечения и концентрирования этих элементов в экстракционных [1–4] и сорбционных [5] системах. Экстракционная способность таких соединений в хлоридных системах значительно ниже, чем в нитратных [6]. Для заметного перехода РЗЭ(III) в органическую фазу требуется значительный избыток ионов Cl<sup>-</sup> в водной фазе и высокая концентрация экстрагента в органической фазе. Для повышения степени извлечения ионов металлов при их экстракции используются смеси экстрагентов, дающие синергетический эффект – неаддитивное увеличение коэффициентов распределения ионов металлов [7–10]. Значительный синергетический эффект обнаружен при экстракции РЗЭ(III) сме-

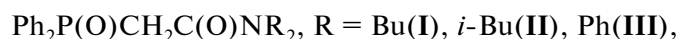
сями КМФО и теноилтрифторацетона [11], 4-бензоил-3-метил-1-фенил-5-пиразолона [12], хлорированного дикарболлида кобальта [13, 14], пикролоновой кислоты [15], а также ионной жидкости (ИЖ) – бис[(трифторметил)сульфонил]имида 1-бутил-3-метилимидазолия (C<sub>4</sub>mimTf<sub>2</sub>N) [16, 17] в органических растворителях. Причиной синергетических эффектов в таких системах является вхождение гидрофобных анионов в состав экстрагируемых комплексов РЗЭ(III). Источником гидрофобных анионов могут быть бинарные экстрагенты – соли четвертичных аммониевых оснований (ЧАО) с анионами органических кислот [18]. Закономерности экстракции ионов металлов бинарными экстрагентами детально рассмотрены в [18–21].

Показано, что экстракция РЗЭ(III) нейтральными экстрагентами (триоктилфосфиноксидом или краун-эфирами) из слабокислых растворов возрастает в присутствии катионообменного экс-

трагента – динонилнафталинсульфокислоты (ДННСК) [22]. Однако сведения о влиянии бинарных экстрагентов с участием динонилнафталинсульфонатов на экстракцию ионов металлов растворами КМФО отсутствуют.

Цель работы – исследование влияния строения КМФО на их экстракционную способность по отношению к РЗЭ(III) в хлоридных средах в присутствии бинарных экстрагентов с анионом ДННСК [А<sup>-</sup>]. Для этого рассмотрено межфазное

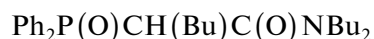
распределение РЗЭ(III) между растворами HCl и органической фазой, содержащей соединения I–V, различающиеся природой заместителей при атомах фосфора или азота и характером фрагмента, соединяющего координирующие группы, а также бинарные экстрагенты – динонилнафталинсульфонаты тетраэтиламмония (Et<sub>4</sub>NA), триэтилбензиламмония (Et<sub>3</sub>BnNA), тетрабутиламмония (Bu<sub>4</sub>NA) и триоктилметиламмония (Oct<sub>3</sub>MeNA).



I–III



IV



V

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Соединения I–V получены известным методом [23]. Бинарные экстрагенты Et<sub>4</sub>NA, Et<sub>3</sub>BnNA, Bu<sub>4</sub>NA и Oct<sub>3</sub>MeNA синтезировали обменной реакцией ДННСК с бромидом тетраэтиламмония, триэтилбензиламмония, тетрабутиламмония и хлорида триоктилметиламмония (Aliquat 336, Sigma-Aldrich) соответственно в щелочной среде по методу [24]. Динонилнафталинсульфокислоту (Sigma-Aldrich) очищали по методике [25]. В качестве органических растворителей использовали нитробензол, 1,2-дихлорэтан, *o*-ксилол и хлороформ марки “х. ч.” без дополнительной очистки. Растворы экстрагентов в органических растворителях готовили по точным навескам.

Исходные водные растворы с содержанием каждого из РЗЭ  $2 \times 10^{-6}$  моль/л готовили растворением соответствующих хлоридов в воде с последующим добавлением раствора HCl до требуемой концентрации. Используемые реактивы соответствовали марке “х. ч.”.

Опыты по экстракции проводили в пробирках с притертými пробками при температуре  $22 \pm 2^\circ\text{C}$  и соотношении объемов органической и водной фаз 1 : 1. Контакт фаз осуществляли на роторном аппарате для перемешивания со скоростью вращения 60 об/мин в течение 1 ч. Предварительно установлено, что этого времени достаточно для установления постоянных значений коэффициентов распределения РЗЭ ( $D_{Ln}$ ).

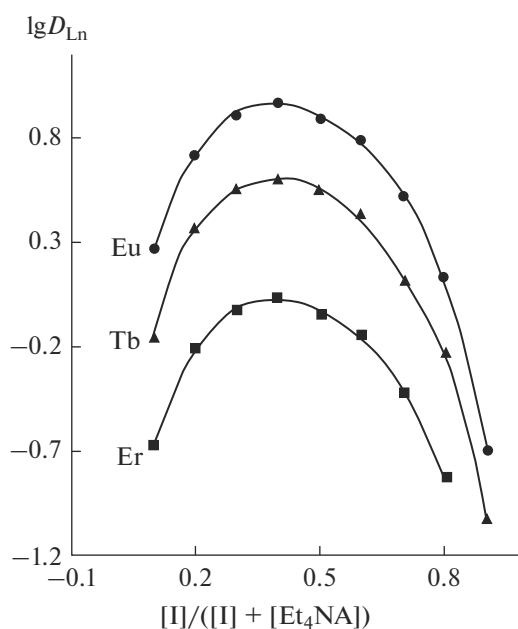
Концентрацию РЗЭ в исходных и равновесных водных растворах определяли масс-спектральным методом с ионизацией пробы в индуктивно-связанной плазме (ИСП-МС) с использо-

ванием масс-спектрометра X-7 (Thermo Electron, США) по ранее описанной методике [26]. Концентрацию элементов в органической фазе определяли по уравнению материального баланса. Величины  $D_{Ln}$  рассчитывали как отношение концентраций элементов в равновесных органической и водной фазах. Погрешность определения  $D_{Ln}$  не превышала 5%. Концентрацию HCl в равновесных водных фазах определяли потенциометрическим титрованием раствором NaOH. Реэкстракцию ионов РЗЭ(III) проводили 0.1M раствором оксиэтилидендифосфоновой кислоты.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предварительно было установлено, что 0.1 M растворы КМФО и бинарных экстрагентов в дихлорэтано практически не экстрагируют РЗЭ(III) из 3 M раствора HCl; величины  $D_{Ln}$  в таких системах не превышают  $1 \times 10^{-2}$ . Однако при экстракции смесями КМФО I и Et<sub>4</sub>NA в дихлорэтано наблюдается значительное увеличение экстракции РЗЭ(III) (рис. 1). Наблюдаемый синергетический эффект может быть связан с вхождением гидрофобных анионов ДННСК в состав экстрагируемых комплексов, что приводит к увеличению их гидрофобности. Аналогичный эффект наблюдался ранее при экстракции РЗЭ(III) смесями ИЖ и КМФО из солянокислых растворов [17].

В ряду РЗЭ эффективность экстракции смесью КМФО и бинарного экстрагента снижается от La(III) к Lu(III) по мере увеличения атомного номера (*Z*) элемента (рис. 2), что связано с увеличением энергии гидратации ионов  $\text{Ln}^{3+}$  вследствие уменьшения их ионных радиусов с возраст-

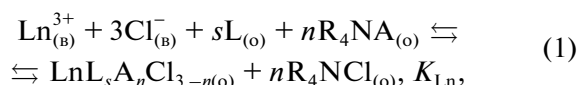


**Рис. 1.** Экстракция Eu(III), Tb(III) и Er(III) из 3 М раствора HCl изомолярными смесями КМФО I и Et<sub>4</sub>NA в дихлорэтане в зависимости от мольной доли соединения I в органической фазе. [I] + [Et<sub>4</sub>NA] = 0.1 М.

танием Z [27]. Положение Y(III) в ряду РЗЭ(III) между Ho(III) и Er(III) соответствует близости их ионных радиусов [28]. Аналогичный характер зависимости  $\lg D_{Ln}-Z$  наблюдался при экстракции РЗЭ(III) растворами КМФО в присутствии C<sub>4</sub>mimTf<sub>2</sub>N из солянокислых растворов [17].

Величина коэффициента разделения La(III) и Lu(III),  $\beta_{La/Lu} = D_{La}/D_{Lu}$ , при экстракции смесью КМФО и бинарного экстрагента в дихлорэтане ( $\beta_{La/Lu} = 16.2$ ) превышает таковую в системе бинарный экстрагент–дихлорэтан ( $\beta_{La/Lu} = 2.5$ ). Это свидетельствует о значительном повышении селективности экстракции РЗЭ(III) из солянокислых растворов растворами Et<sub>4</sub>NA в присутствии КМФО.

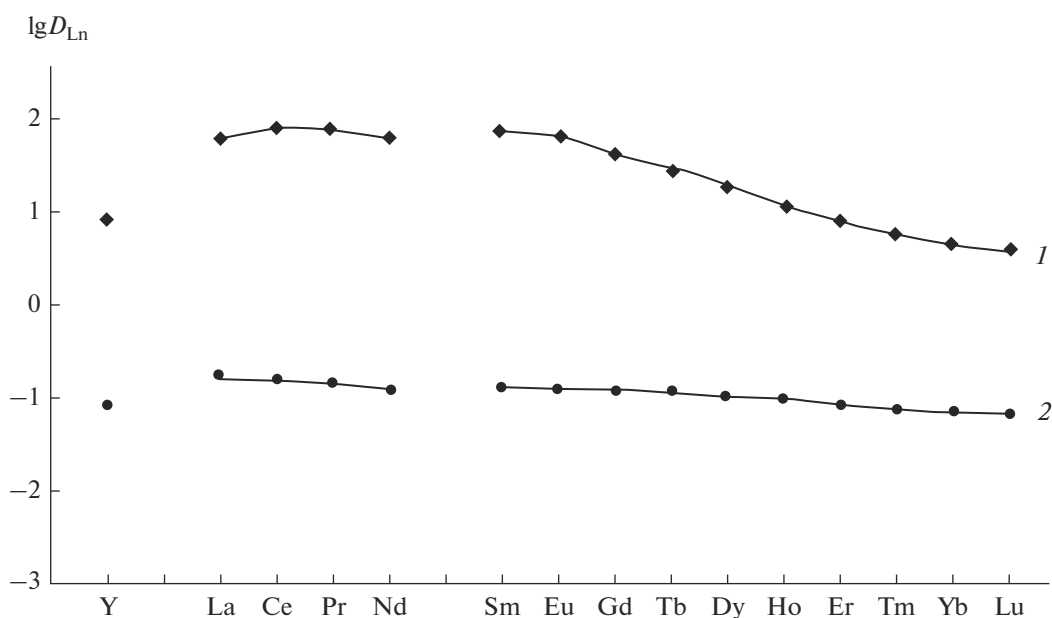
Процесс экстракции РЗЭ(III) из хлоридных растворов растворами КМФО (L) в присутствии бинарного экстрагента (R<sub>4</sub>NA) может быть описан уравнением:



где  $K_{Ln}$  – константа экстракции; символы (в) и (о) относятся к компонентам водной и органической фаз соответственно), а зависимость  $D_{Ln}$  от концентраций компонентов органической и водной фаз может быть выражена как

$$D_{Ln} = K_{Ln}[\text{L}]_{(о)}^s[\text{Cl}^{-}]_{(в)}^3[\text{R}_4\text{NA}]_{(о)}^n[\text{R}_4\text{NCl}]_{(о)}^{-n}. \quad (2)$$

Выражение (2) в логарифмической форме использовано для оценки стехиометрических коэффициентов  $s$  и  $n$  при экстракции РЗЭ(III) из растворов HCl. При постоянных концентрациях HCl и КМФО в водной и органической фазе соответственно тангенсы угла наклона зависимостей  $\lg D_{Ln}-\lg [\text{Et}_4\text{NA}]$  близки к 3 (рис. 3), что соответствует извлечению комплексов РЗЭ(III) с соотношением  $\text{Ln} : \text{A}^{-} = 1 : 3$ . При постоянной



**Рис. 2.** Экстракция РЗЭ(III) и Y(III) из 1 М растворов HCl 0.01 М раствором КМФО I в дихлорэтане, содержащем 0.1 М Et<sub>4</sub>NA (1), и 0.1 М раствором Et<sub>4</sub>NA в дихлорэтане (2).

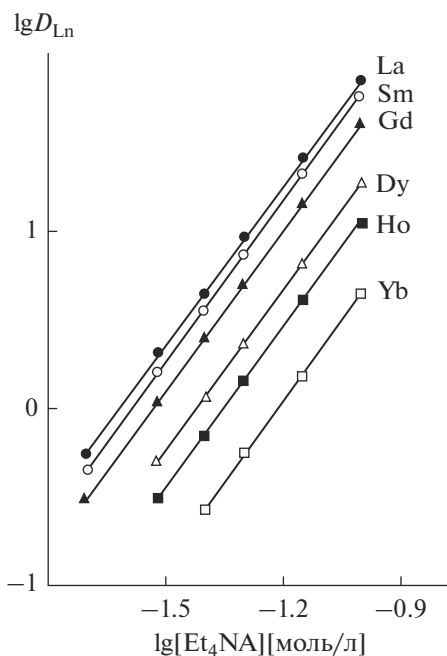


Рис. 3. Зависимость коэффициентов распределения РЗЭ(III) от концентрации  $\text{Et}_4\text{NA}$  в органической фазе, содержащей 0.05 М соединения I, при экстракции из 3 М раствора  $\text{HCl}$ .

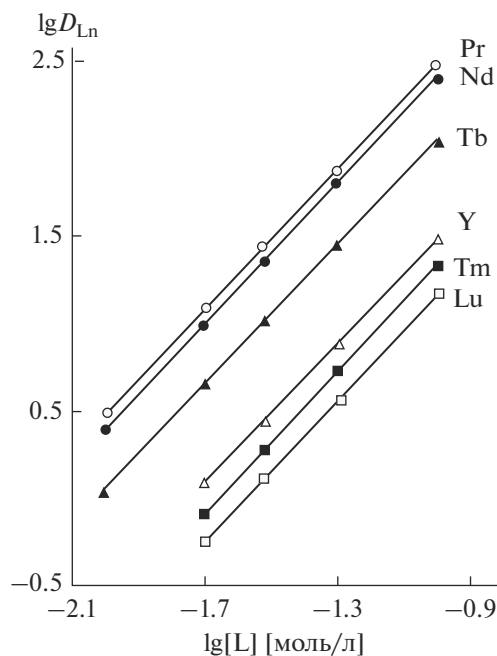
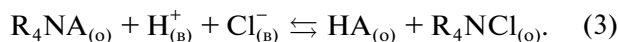


Рис. 4. Зависимость коэффициентов распределения РЗЭ(III) от концентрации КМФО I в органической фазе, содержащей 0.1 М  $\text{Et}_4\text{NA}$ , при экстракции из 3 М раствора  $\text{HCl}$ .

концентрации  $\text{Et}_4\text{NA}$  в органической фазе угловой наклон зависимостей  $\lg D_{Ln} - \lg[\text{КМФО}]$  близок к 2 (рис. 4), что указывает на экстракцию РЗЭ(III) из солянокислых растворов раствором КМФО в присутствии бинарного экстрагента в виде комплексов  $\text{LnL}_2\text{A}_3$ .

При постоянных исходных концентрациях КМФО и  $\text{Et}_4\text{NA}$  в органической фазе увеличение концентрации  $\text{HCl}$  в равновесной водной фазе сопровождается снижением  $D_{Ln}$  (рис. 5). Это может быть связано с уменьшением равновесной концентрации бинарного экстрагента в органической фазе вследствие протекания реакции:



Природа катиона бинарного экстрагента оказывает существенное влияние на эффективность экстракции РЗЭ(III). Величина  $D_{Eu}$  при экстракции 0.05 М растворами КМФО I в дихлорэтане, содержащем 0.1 М  $\text{R}_4\text{NA}$ , из 1 М раствора  $\text{HCl}$  возрастает в ряду  $\text{Oct}_3\text{MeNA} (<10^{-2}) < \text{Bu}_4\text{NA} (1.2) < \text{Et}_3\text{BnNA} (49) < \text{Et}_4\text{NA} (1740)$  по мере снижения гидрофобности катиона ЧАО. Аналогичная зависимость отмечалась при экстракции ионов металлов нейтральными экстрагентами в системах с ИЖ на основе аниона бис[(трифторметил)сульфонил]имида при уменьшении длины алкильной цепочки катиона алкилметилимидазолия [29].

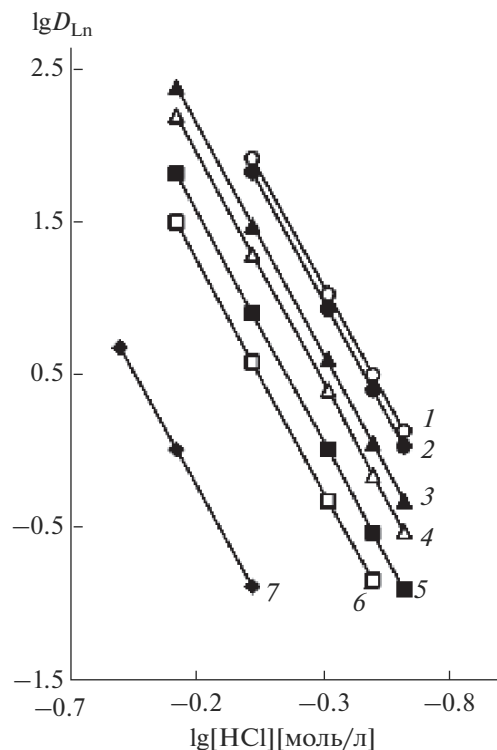


Рис. 5. Зависимость коэффициентов распределения Се (1), Eu (2, 7), Tb (3), Dy (4), Er (5) и Lu (6) от концентрации  $\text{HCl}$  в водной фазе при экстракции 0.01 М раствором КМФО I в дихлорэтане, содержащем 0.1 М  $\text{Et}_4\text{NA}$  (1–6), и 0.1 М раствором  $\text{Et}_4\text{NA}$  в дихлорэтане (7).

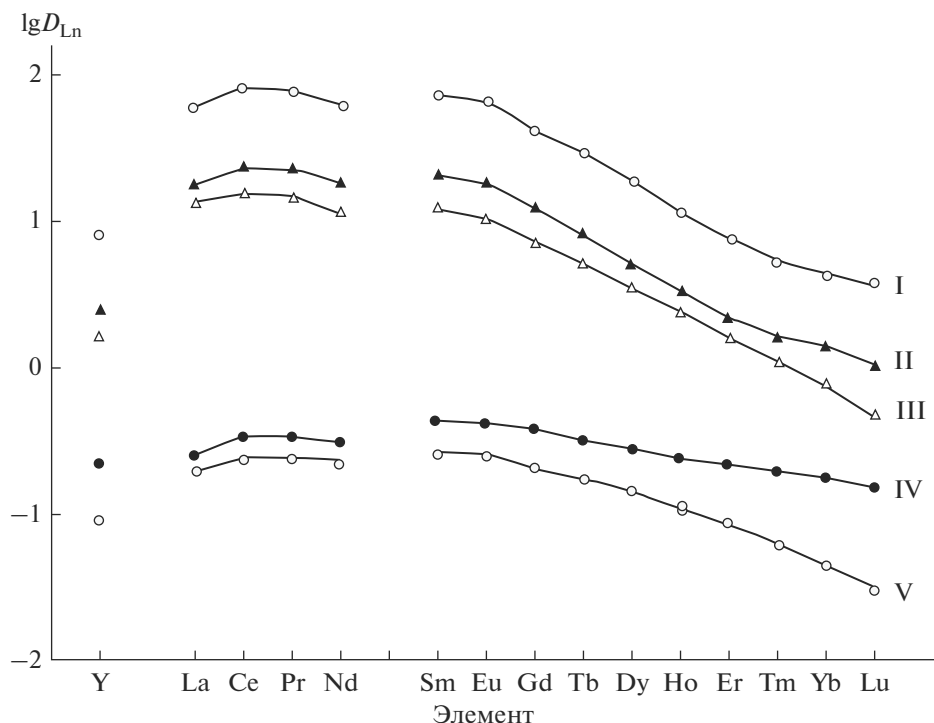


Рис. 6. Экстракция PЗЭ(III) и Y(III) из 3 М растворов HCl 0.05 М растворами КМФО I–V в дихлорэтане, содержащем 0.1 М Et<sub>4</sub>NA.

Природа органического растворителя оказывает существенное влияние на экстракцию PЗЭ(III) растворами КМФО [30]. При экстракции PЗЭ(III) из 3 М раствора HNO<sub>3</sub> 0.05 М растворами КМФО I величина  $D_{Eu}$  возрастает в ряду органических растворителей *o*-ксилол (0.018) < 1,2-дихлорэтан (0.95) < нитробензол (19.1) по мере увеличения их полярности. В системе с Et<sub>4</sub>NA изменение полярности органического разбавителя оказывает значительно меньшее влияние на эффективность экстракции PЗЭ(III): при экстракции 0.05 М растворами КМФО I и 0.1 М Et<sub>4</sub>NA в органических растворителях из 3 М раствора HCl величина  $D_{Eu}$  возрастает в ряду хлороформ (1.71) < *o*-ксилол (25.7) < 1,2-дихлорэтан (64.5) < нитробензол (73.2). Это может быть связано с более высокой гидрофобностью комплексов LnL<sub>2</sub>A<sub>3</sub>, чем у координационно-сольватированных нитратов PЗЭ(III). Подавление экстракции при использовании хлороформа в качестве растворителя связано, по-видимому, с сольватацией донорных центров молекулы экстрагента в результате образования водородных связей P=O...HCCl<sub>3</sub>, приводящей к снижению активности экстрагента в органической фазе.

Известно, что высокая экстракционная способность КМФО по отношению к PЗЭ(III) связана с их бидентатной координацией в процессе образования экстрагируемых комплексов [31]. Для

сравнения экстракционной способности КМФО I–V по отношению к PЗЭ(III) в системах с R<sub>4</sub>NA определены значения  $D_{Ln}$  при экстракции из 3 М раствора HCl растворами этих соединений в дихлорэтане в присутствии Et<sub>4</sub>NA (рис. 6). Общие закономерности влияния строения КМФО на их экстракционную способность [32–34] сохраняются, по-видимому, для систем с R<sub>4</sub>NA. Соединения I–III с фенильными заместителями при атоме фосфора по своей экстракционной способности значительно превосходят свой диалкилзамещенный аналог IV. Такое влияние заместителя при атоме фосфора, наблюдавшееся ранее при экстракции Am(III) и PЗЭ(III) из азотнокислых растворов растворами этих соединений в дихлорэтане [33], связано с проявлением эффекта арильного упрочнения (ЭАУ) экстрагируемых комплексов, возможные причины которого неоднократно обсуждались в литературе [31, 35–37]. Величина ЭАУ,  $F = D_{Ln}(I)/D_{Ln}(IV)$ , уменьшается в ряду PЗЭ(III) от La(229) к Lu(24.5) (рис. 6), что отмечалось и при экстракции нитратных комплексов PЗЭ(III) растворами этих КМФО [38]. При экстракции Eu(III) из азотнокислых растворов растворами КМФО в дихлорэтане  $F = 47$  [38], тогда как в присутствии Et<sub>4</sub>NA  $F = 155$ , что указывает на усиление ЭАУ с увеличением гидрофобности анионов, входящих в состав экстрагируемых комплексов PЗЭ(III).

Природа заместителей при атоме азота в молекулах КМФО заметно влияет на экстракцию РЗЭ(III) этими соединениями в присутствии  $\text{Et}_4\text{NA}$  (рис. 6). КМФО II с фенильными заместителями при атоме азота экстрагирует РЗЭ(III) менее эффективно, чем его алкилзамещенный аналог I, что связано со снижением донорной способности группы  $\text{C}=\text{O}$  при увеличении электроотрицательности заместителя [34]. Эффективность экстракции соединением II с изобутильными заместителями при атоме азота снижается по сравнению с соединением I, что может быть связано со стерическими препятствиями комплексообразованию с ионами РЗЭ(III), а также с влиянием заместителя на изменение торсионного угла между функциональными группами и на ширину области распространения молекулярных электростатических полей электронодонорных групп [39].

Замена атома Н в метиленовом мостике, соединяющем координирующие группы молекулы КМФО, на алкильный радикал приводит к резкому снижению  $D_{\text{Ln}}$  при экстракции соединением V. Это может быть связано как с действием стерических факторов [40], так и с уменьшением в молекуле этого соединения числа протонов в мостике, снижающим возможность стабилизации экстрагируемого комплекса за счет специфического взаимодействия с полярным разбавителем [30].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные данные показали, что эффективность экстракции РЗЭ(III) из солянокислых растворов растворами КМФО существенно возрастает в присутствии динонилнафталинсульфонатов четвертичных аммониевых оснований, что может быть использовано для извлечения и концентрирования этих элементов. Снижение гидрофобности катионной части бинарного экстрагента способствует повышению эффективности извлечения РЗЭ(III) в органическую фазу. Экстракционная способность КМФО в системах с бинарным экстрагентом изменяется в широких пределах в зависимости от природы заместителей при атомах фосфора и азота, а также характера фрагмента, соединяющего координирующие группы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Медведь Т.Я., Чмутова М.К., Нестерова Н.П. и др. // Изв. АН СССР. Сер. хим. 1981. № 9. С. 2121.
2. Chmutova M.K., Litvina M.N., Pribylova G.A. et al. // Radiochem. 1999. V. 41. № 4. P. 349. [Чмутова М.К., Литвина М.Н., Прибылова Г.А. и др. // Радиохимия. 1999. Т. 41. № 4. С. 331.]
3. Alyapyshev M.Yu., Babain V.A., Ustyynyuk Yu.A. // Russ. Chem. Rev. 2016. V. 85. № 9. P. 943. <https://doi.org/10.1070/RCR4589> [Аляпышев М.Ю., Бабаин В.А., Устынюк Ю.А. // Успехи химии. 2016. Т. 85. № 9. С. 943.]
4. Leoncini A., Huskens J., Werboon W. // Chem. Soc. Rev. 2017. V. 46. P. 7229.
5. Мясоедова Г.В. // Рос. хим. журн. 2005. Т. 49. № 2. С. 72.
6. Turanov A.N., Karandashev V.K., Yarkevich A.N., Safronova Z.V. // Radiochem. 2007. V. 49. № 2. P. 166. doi 10.1134/S1066362207020129 [Туранов А.Н., Карандашев В.К., Яркевич А.Н., Сафронова З.В. // Радиохимия. 2007. Т. 49. № 2. С. 148.]
7. Atanassova M., Todorova S., Kurteva V. et al. // Sep. Purif. Technol. 2018. V. 204. P. 328.
8. Vantura P., Makrlcic E., Selucky P. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2018. V. 317. P. 443.
9. Huang P.W., Wang C.Z., Wu Q.Y. et al. // Dalton Trans. 2018. V. 47. P. 5474.
10. Atanassova M., Kurteva V. // RSC Adv. 2016. V. 6. P. 11303.
11. Rao L., Xia Y., Rapko B.M., Martin P.F. // Solvent Extr. Ion Exch. 1998. V. 16. P. 913.
12. Turanov A.N., Karandashev V.K., Kharlamov A.V., Bondarenko N.A. // Solvent Extr. Ion Exch. 2014. V. 32. P. 492.
13. Rais J., Tachimori S. // J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett. 1994. V. 188. № 2. P. 157.
14. Smirnov I.V. // Radiochem. 2007. V. 49. № 1. P. 44. doi 10.1134/S1066362207010080 [Смирнов И.В. // Радиохимия. 2007. Т. 49. № 1. С. 40.]
15. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Шарова Е.В. и др. // Радиохимия. 2013. Т. 55. № 2. С. 156. [Turanov A.N., Karandashev V.K., Sharova E.V. et al. // Radiochem. 2013. V. 55. № 2. P. 203. doi 10.1134/S1066362213020100]
16. 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. et al. // Radiochem. 2013. V. 55. № 4. P. 382. doi 10.1134/S1066362213040073]
17. Turanov A.N., Karandashev V.K., Yarkevich A.N. // Russ. J. Inorg. Chem. 2018. V. 63. № 3. P. 406. doi 10.1134/S0036023618030221 [Туранов А.Н., Карандашев В.К., Яркевич А.Н. // Журн. неорганической химии. 2018. Т. 63. № 3. С. 382. doi 10.7868/S0044457X18030200]
18. Холькин А.И., Кузьмин В.И. // Журн. неорганической химии. 1982. Т. 27. № 8. С. 2070.
19. Kholkin A.I., Pashkov G.L., Fleitlich I.Yu. et al. // Hydrometallurgy. 1994. V. 36. P. 109.
20. Kholkin A.I., Belova V.V., Pashkov G.L. et al. // J. Mol. Liq. 1999. V. 82. P. 131.
21. Belova V.V., Voshkin A.A., Kholkin A.I., Payrtman A.K. // Hydrometallurgy. 2009. V. 97. P. 198.
22. Ramadan A., Mahmoud M., Khalifa S.M., Souka N. // J. Radioanal. Chem. Lett. 1993. V. 176. P. 457.
23. Turanov A.N., Karandashev V.K., Kharitonov A.V. et al. // Russ. J. Gen. Chem. 1999. V. 69. № 7. P. 1068. [Туранов А.Н., Карандашев В.К., Харитонов А.В. и др. // Журн. общей химии. 1999. Т. 69. № 7. С. 1109.]
24. Belova V.V., Kulichenkov S.A., Voshkin A.A. et al. // Russ. J. Inorg. Chem. 2007. V. 52. № 3. P. 460. doi 10.1134/S003602360703028X [Белова В.А., Куличен-

- ков С.А., Вошкин А.А. и др. // Журн. неорган. химии. 2007. Т. 52. № 3. С. 513.]
25. *Danesi P.R., Chiarizia R., Scibona G.* // J. Inorg. Nucl. Chem. 1973. V. 35. P. 3926.
26. *Turanov A.N., Karandashev V.K., Baulin V.E., Tsvetkov E.N.* // Russ. J. Inorg. Chem. 1995. V. 40. № 11. P. 1854. [Туранов А.Н., Карандашев В.К., Баулин В.Е., Цветков Е.Н. // Журн. неорган. химии. 1995. Т. 40. № 11. С. 1926.]
27. *Яцимирский К.Б., Костромина Н.А., Шека З.А. и др.* Химия комплексных соединений редкоземельных элементов. Киев.: Наук. думка, 1966. 494 с.
28. *Shannon R.D.* // Acta Crystallogr. 1976. № 32. P. 751.
29. *Dietz M.L., Dzielawa J.A., Laszak I. et al.* // Green Chem. 2003. V. 5. P. 682.
30. *Розен А.М., Никифоров А.С., Николотова З.И., Карташева Н.А.* // Докл. АН СССР. 1986. Т. 286. № 3. С. 667.
31. *Розен А.М., Крупнов Б.В.* // Успехи химии. 1996. Т. 65. № 11. С. 1052. [*Rozen A.M., Krupnov B.V.* // Russ. Chem. Rev. 1996. V. 65. № 11. P. 973. doi 10.1070/RC1996v065n11ABEH000241]
32. *Horwitz E.P., Martin K.A., Diamond H., Kaplan L.* // Solvent Extr. Ion Exch. 1986. V. 4. P. 449.
33. *Чмутова М.К., Иванова Л.А., Кочеткова Н.Е. и др.* // Радиохимия. 1995. Т. 37. № 5. С. 422.
34. *Чмутова М.К., Литвина М.Н., Прибылова Г.А. и др.* // Радиохимия. 1995. Т. 37. № 5. С. 430.
35. *Розен А.М., Николотова З.И., Карташева Н.А., Юдина К.С.* // Докл. АН СССР. 1975. Т. 222. № 5. С. 1151.
36. *Кабачник М.И., Мясоедов Б.Ф., Мاستрюкова Т.А. и др.* // Изв. РАН. Сер. хим. 1996. № 11. С. 2624.
37. *Tsvetkov E.N., Evreinov V.I., Bondarenko N.A. et al.* // Russ. J. Gen. Chem. 1996. V. 66. № 7. P. 1054. [Цветков Е.Н., Евреинов В.И., Бондаренко Н.А. и др. // Журн. общей химии. 1996. Т. 66. № 7. С. 1081.]
38. *Литвина М.Н., Чмутова М.К., Мясоедов Б.Ф., Кабачник М.И.* // Радиохимия. 1996. Т. 38. № 6. С. 525.
39. *Сударушкин С.К., Моргалюк В.П., Тананаев И.Г. и др.* // Изв. РАН. Сер. хим. 2006. № 4. С. 609.
40. *Кочеткова Н.Е., Койро О.Э., Нестерова Н.П. и др.* // Радиохимия. 1986. Т. 28. № 3. С. 338.