

Экстракция РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) из азотнокислых растворов дифенил(дибутилкарбамоилметил)фосфиноксидом в присутствии бис[(трифторметил)сульфонил]имидов четвертичных аммониевых оснований

© А. Н. Туранов*^а, В. К. Карандашев^б, А. Н. Яркевич^в, В. А. Хвостиков^б

^а Институт физики твердого тела РАН, 142432, Черноголовка Московской обл., ул. Акад. Осипьяна, д. 2;
* e-mail: turanov@issp.ac.ru

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

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

Получена 29.10.2018, после доработки 24.01.2019, принята к публикации 24.01.2019

УДК 542.61: 546.442

Установлено, что экстракция РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) из азотнокислых растворов растворами дифенил(дибутилкарбамоилметил)фосфиноксида значительно возрастает в присутствии ионных жидкостей с анионом бис[(трифторметил)сульфонил]имида и катионами четвертичных аммониевых оснований. Определена стехиометрия извлекаемых комплексов. Рассмотрено влияние концентрации HNO_3 в водной фазе и природы катионной части ионной жидкости и органического растворителя на эффективность извлечения ионов РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) в органическую фазу.

Ключевые слова: экстракция, синергизм, редкоземельные элементы(III), уран(VI), торий(IV), карбамоилметилфосфиноксид, ионные жидкости.

DOI: 10.1134/S003383111906008X

Известно, что бидентатные фосфорорганические соединения, в частности, диарил(диалкилкарбамоилметил)фосфиноксиды (КМФО), обладают высокой экстракционной способностью по отношению к актинидам и редкоземельным элементам (РЗЭ) и используются для извлечения и концентрирования этих элементов в экстракционных [1, 2] и сорбционных [3] системах. Эффективность экстракции актинидов и РЗЭ(III) растворами КМФО из азотнокислых растворов существенно повышается в присутствии хлорированного дикарболлида кобальта (ХДК) в органической фазе [4], а также HClO_4 или перхлоратов щелочных металлов в водной [5, 6].

В последнее время значительно возрос интерес к использованию ионных жидкостей (ИЖ) в экстракционной практике концентрирования и разделения органических и неорганических соединений в качестве несмешивающейся с водой фазы [7–10]. Было показано, что экстракция актинидов и РЗЭ(III) растворами КМФО в ИЖ – гексафторфосфатах и бис[(трифторметил)сульфонил]имидах 1-алкил-3-метилимидазолия – значительно возрастает по сравнению с экстракцией растворами КМФО в традиционных органических растворителях [11, 12]. Примеры использования ИЖ в процессах извлечения и концентрирования РЗЭ(III) и актинидов

приведены в обзорах [13–15]. Установлено, что для эффективного извлечения РЗЭ(III) из растворов HNO_3 и HCl достаточно даже относительно небольшой концентрации ИЖ в органическом растворителе, содержащем КМФО [16, 17]. Это позволяет рассматривать ИЖ как активный компонент синергетической смеси. Рассмотрено влияние природы катионной и анионной частей ИЖ на величину синергетического эффекта при экстракции актинидов, РЗЭ(III) и Sr(II) из азотнокислых растворов. Увеличение гидрофобности анионной части приводит к увеличению экстракции ионов металлов растворами КМФО, а катионной – к ее уменьшению [10, 18].

Использование бис[(трифторметил)сульфонил]имида в качестве анионного компонента ИЖ определяется его высокой гидрофобностью и устойчивостью в азотнокислых средах по сравнению с анионом гексафторфосфата [13]. В большинстве опубликованных работ по экстракции ионов металлов в качестве ИЖ использовали в основном ИЖ на основе катионов 1-алкил-3-метилимидазолия. Однако в последнее время возрос интерес к использованию в экстракционной практике ИЖ с катионами четвертичных аммониевых оснований (ЧАО), что связано с их большей доступностью и меньшей токсичностью [19].

В настоящей работе исследовано влияние природы катионной части ИЖ на эффективность экстракции РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) из азотнокислых растворов растворами КМФО в органических растворителях. Для этого рассмотрено межфазное распределение РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) между растворами HNO_3 и органической фазой, содержащей дифенил(дибутилкарбамоилметил)фосфиноксид $\text{Ph}_2\text{P}(\text{O})\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{NBu}_2$ и бис[(трифторметил)сульфонил]имиды тетраэтиламмония ($\text{Et}_4\text{NTf}_2\text{N}$), триэтилбензиламмония ($\text{Et}_3\text{BnNTf}_2\text{N}$), тетрабутиламмония ($\text{Bu}_4\text{NTf}_2\text{N}$) и триоктилметиламмония ($\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$).

Экспериментальная часть

Дифенил(дибутилкарбамоилметил)фосфиноксид (КМФО Ph_2Bu_2) получали известным методом [20]. Ионные жидкости $\text{Et}_4\text{NTf}_2\text{N}$, $\text{Et}_3\text{BnNTf}_2\text{N}$, $\text{Bu}_4\text{NTf}_2\text{N}$ и $\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$ получали обменной реакцией литиевой соли бис[(трифторметил)сульфонил]имида (Sigma–Aldrich) с бромидами тетраэтиламмония, триэтилбензиламмония, тетрабутиламмония и хлоридом триоктилметиламмония (Aliquat 336, Sigma–Aldrich) соответственно. В качестве органического растворителя использовали 1,2-дихлорэтан, нитробензол и *o*-ксилол марки х.ч. без дополнительной очистки. Растворы КМФО и ИЖ в органических растворителях готовили по точным навескам.

Распределение РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) в экстракционных системах изучали на модельных растворах 0.1–7.0 моль/л HNO_3 . Исходные водные растворы с концентрацией каждого элемента 2×10^{-6} моль/л готовили растворением соответствующих нитратов в воде с последующим добавлением HNO_3 до требуемой концентрации. Используемые реактивы соответствовали марке х.ч.

Опыты по экстракции проводили в пробирках с притертыми пробками при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$ и соотношении объемов органической и водной фаз 1 : 1. Контакт фаз осуществляли на роторном аппарате для перемешивания со скоростью 60 об/мин в течение 1 ч. Предварительно установлено, что этого времени достаточно для установления постоянных значений коэффициентов распределения (D).

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) по ранее описанной методике [21]. Содержание элементов в органической фазе определяли по разнице их исходных и равновесных концентраций в водной фа-

зе. Коэффициенты распределения элементов рассчитывали как отношение их концентраций в равновесных фазах. Погрешность определения коэффициентов распределения не превышала 5%. Концентрацию ионов Tf_2N^- в равновесных водных растворах определяли атомно-эмиссионным методом с ионизацией пробы в индуктивно связанной плазме с использованием спектрометра ICAP-61 (Thermo Jarrell Ash, США) по содержанию серы. Концентрацию HNO_3 в равновесных водных фазах определяли потенциометрическим титрованием раствором NaOH .

Результаты и обсуждение

Предварительно установлено, что растворы исследованных ИЖ в дихлорэтане не экстрагируют РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) из азотнокислых растворов (величины D не превышают 10^{-2}). Однако при экстракции РЗЭ(III) смесями КМФО и ИЖ в дихлорэтане происходит значительное увеличение извлечения РЗЭ(III) в органическую фазу (рис. 1). Наблюдаемый синергетический эффект может быть связан с вхождением гидрофобных анионов Tf_2N^- в состав экстрагируемых комплексов, приводящим к увеличению их гидрофобности по сравнению с координационно-сольватированными нитратами РЗЭ(III). Протеканием подобного процесса объясняется значительное увеличение экстракции РЗЭ(III) и Am(III) растворами КМФО в присутствии гидрофобных пикрат-анионов [22] или анионов ХДК [23].

Величина синергетического эффекта $S = D/D_0$ (D и D_0 – коэффициенты распределения в присутствии и в отсутствие ИЖ в органической фазе соответственно) увеличивается в ряду ИЖ $\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N} < \text{Bu}_4\text{NTf}_2\text{N} < \text{Et}_3\text{BnNTf}_2\text{N} < \text{Et}_4\text{N} \cdot \text{Tf}_2\text{N}$ (рис. 1) по мере снижения гидрофобности катиона ИЖ. Ранее отмечалось снижение эффектив-

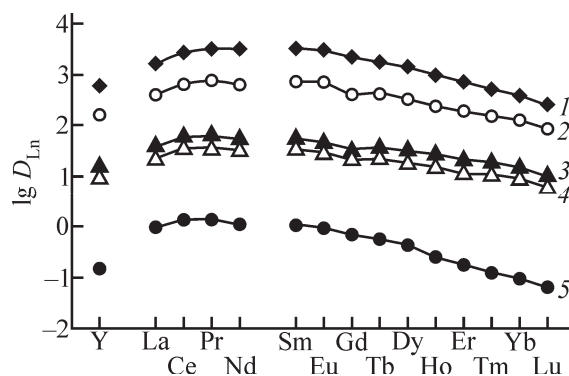


Рис. 1. Экстракция РЗЭ(III) и Y(III) из растворов 3 моль/л HNO_3 растворами 0.05 моль/л КМФО в дихлорэтане, содержащем 0.1 моль/л $\text{Et}_4\text{NTf}_2\text{N}$ (1), $\text{Et}_3\text{BnNTf}_2\text{N}$ (2), $\text{Bu}_4\text{NTf}_2\text{N}$ (3), $\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$ (4), и раствором 0.05 моль/л КМФО в дихлорэтане без добавок (5).

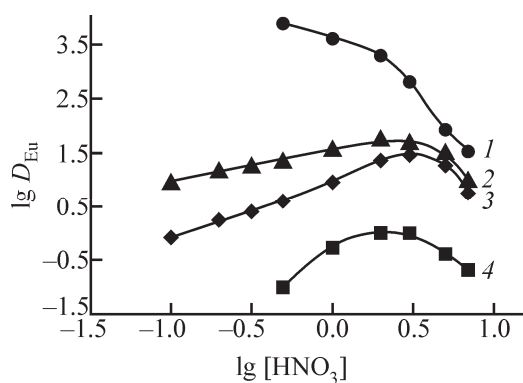


Рис. 2. Зависимость коэффициентов распределения Eu(III) от концентрации HNO_3 в равновесной водной фазе при экстракции растворами 0.05 моль/л КМФО в дихлорэтано, содержащем 0.1 моль/л $\text{Et}_3\text{BnNTf}_2\text{N}$ (1), $\text{Vu}_4\text{NTf}_2\text{N}$ (2), $\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$ (3), и раствором 0.05 моль/л КМФО в дихлорэтано без добавок (4).

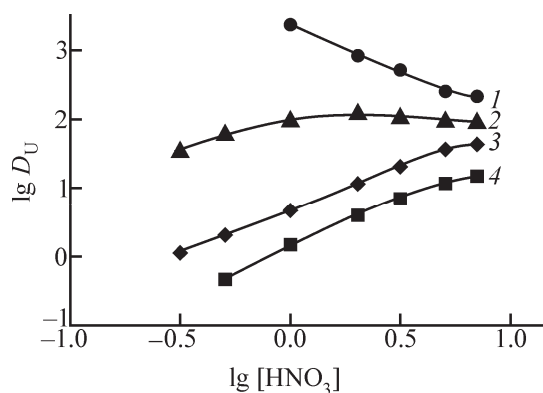


Рис. 3. Зависимость коэффициентов распределения U(VI) от концентрации HNO_3 в равновесной водной фазе при экстракции растворами 0.005 моль/л КМФО в дихлорэтано, содержащем 0.1 моль/л $\text{Et}_3\text{BnNTf}_2\text{N}$ (1), $\text{Vu}_4\text{NTf}_2\text{N}$ (2), $\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$ (3), и раствором 0.005 моль/л КМФО в дихлорэтано без добавок (4).

ности экстракции ионов металлов растворами нейтральных донорно-активных экстрагентов в ИЖ на основе катионов 1-алкил-3-метилимидазолия при увеличении длины алкильной цепочки в катионе ИЖ [24].

При экстракции из раствора 3 моль/л HNO_3 величины S увеличиваются в ряду PЗЭ(III) от La(III) до Lu(III) (рис. 1) по мере уменьшения ионных радиусов ионов Ln^{3+} и увеличения их энергии гидратации [25]. По-видимому, замещение в экстрагируемом комплексе анионов NO_3^- на более гидрофобные Tf_2N^- оказывает большее влияние на экстракцию более гидратированных ионов PЗЭ(III). Это приводит к снижению фактора разделения La/Lu ($\beta_{\text{La/Lu}} = D_{\text{La}}/D_{\text{Lu}}$) от 14.8 при экстракции раствором КМФО до 3.6 при экстракции этим экстрагентом в присутствии $\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$ в органической фазе (рис. 1).

Присутствие ИЖ в органической фазе существенно изменяет характер зависимости эффективности экстракции Eu(III) и U(VI) растворами КМФО от концентрации HNO_3 в водной фазе (рис. 2, 3). В присутствии менее гидрофобных ИЖ $\text{Et}_4\text{NTf}_2\text{N}$ и $\text{Et}_3\text{BnNTf}_2\text{N}$ наблюдается снижение D_{Eu} и D_{U} с ростом $[\text{HNO}_3]$, которое отмечалось ранее и при экстракции растворами КМФО в ИЖ с катионом 1-бутил-3-метилимидазолия (bmimTf_2N) [16, 17]. Причины такого характера зависимости $D-[\text{HNO}_3]$ в системах с ИЖ обсуждались в предыдущих работах [15, 16]. В системах с более гидрофобными ИЖ ($\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$ и $\text{Vu}_4\text{NTf}_2\text{N}$) наблюдаются зависимости $D-[\text{HNO}_3]$ с максимумами (рис. 2, 3). Вероятно, это связано с неполным замещением анионов NO_3^- в экстрагируемых комплексах PЗЭ(III) и U(VI) на гидрофобные ионы Tf_2N^- , т.е. участием ионов NO_3^- в образовании экстрагируемых комплексов в таких системах. Снижение D_{Eu} и D_{U} с ростом $[\text{HNO}_3]$ связано со снижением концентрации свободного экстрагента в органической фазе вследствие соэкстракции HNO_3 [26] и HTf_2N [18]. Положение максимумов на кривых зависимостей $D-[\text{HNO}_3]$ в системе с $\text{Vu}_4\text{NTf}_2\text{N}$ смещается в область меньшей кислотности по сравнению с системой с $\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$ (рис. 2, 3). Это связано с тем, что концентрация ионов Tf_2N^- в водной фазе системы с $\text{Vu}_4\text{NTf}_2\text{N}$ выше, чем в системе с $\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$, т.е. соэкстракция HTf_2N оказывает более заметное влияние на экстракцию ионов металлов в присутствии $\text{Vu}_4\text{NTf}_2\text{N}$.

Известно, что экстракция ионов металлов нейтральными экстрагентами в присутствии ИЖ сопровождается заметным переходом ионов ИЖ в водную фазу [27]. Коэффициенты распределения иона Tf_2N^- между растворами 0.1 моль/л ИЖ в дихлорэтано и раствором 3 моль/л HNO_3 возрастают в ряду $\text{Et}_4\text{NTf}_2\text{N}$ (1.6) < $\text{Et}_3\text{BnNTf}_2\text{N}$ (9.5) < $\text{Vu}_4\text{NTf}_2\text{N}$ (89) < $\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$ (>200) по мере увеличения гидрофобности катионной части этих ИЖ.

Следует отметить, что хотя в системе с $\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$ увеличение эффективности экстракции PЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) раствором КМФО из азотнокислых растворов наблюдается в меньшей степени, чем в системах с менее гидрофобными $\text{Et}_4\text{NTf}_2\text{N}$ и $\text{Et}_3\text{BnNTf}_2\text{N}$, а также bmimTf_2N [16, 17], использование $\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$ позволяет существенно снизить потери этой ИЖ в процессе экстракции. Кроме того, снижение коэффициентов распределения ионов металлов с уменьшением $[\text{HNO}_3]$ (рис. 2, 3) позволяет значительно упростить процесс их реэкстракции. После экстракции PЗЭ(III) из раствора 3 моль/л HNO_3 растворами 0.05 моль/л КМФО и 0.1 моль/л $\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$ или $\text{Et}_3\text{BnNTf}_2\text{N}$

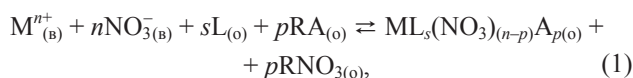
Коэффициенты распределения Eu(III), U(VI) и Th(IV) при их экстракции из раствора 3 моль/л HNO₃ растворами КМФО в дихлорэтано без добавок (D_0) и в дихлорэтано, содержащем 0.1 моль/л Oct₃MeNTf₂N (D)

Ион	[КМФО], моль/л	lg D_0	lg D	S
Th(IV)	0.005	2.43	2.62	1.55
U(VI)	0.005	0.83	1.30	2.95
Eu(III)	0.05	-0.02	1.47	30.9

в дихлорэтано была проведена реэкстракция РЗЭ(III) водой. В системе с Oct₃MeNTf₂N степень реэкстракции РЗЭ(III) превышает 90%, тогда как в системе с Et₃VnNTf₂N РЗЭ(III) практически не переходят в водную фазу. Поэтому в дальнейшем рассмотрены равновесия при межфазном распределении РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) между растворами HNO₃ и органической фазой, содержащей КМФО и Oct₃MeNTf₂N.

Из таблицы видно, что при экстракции Eu(III) величина синергетического эффекта значительно выше, чем при экстракции U(VI) и Th(IV).

Синергетическая экстракция РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) из азотнокислых растворов растворами КМФО (L) в присутствии гидрофобной ИЖ Oct₃MeNTf₂N (RA) может быть описан уравнением



где символы (в) и (о) относятся к компонентам водной и органической фаз, соответственно, с константой экстракции K . Как следует из этого уравнения, экстракция ионов металлов смесью КМФО и Oct₃MeNTf₂N из азотнокислых растворов сопровождается образованием нитрата триоктилметиламмония (RNO₃) в органической фазе. Добавка RNO₃ в органическую фазу, содержащую смесь КМФО и Oct₃MeNTf₂N, приводит к сдвигу равновесия (1) влево, т.е. к уменьшению экстракции ионов металлов. При постоянных концентрациях КМФО и Oct₃MeNTf₂N в органической фазе тангенс угла наклона зависимости $\lg D_{Ln} - \lg[RNO_3]$ близок к -1 (рис. 4).

Поскольку экстракция ионов металлов смесью КМФО и Oct₃MeNTf₂N из азотнокислых растворов в виде комплексов $ML_s(NO_3)_{(n-p)}A_p$ сопровождается экстракцией координационно-сольватированных нитратов $ML_q(NO_3)_n$, коэффициент распределения иона металла в виде комплекса $ML_s(NO_3)_{(n-p)}A_p$ определяется как $D - D_0$ [28]. Зависимость $D - D_0$ от концентраций компонентов органической и водной фаз может быть выражена как

$$D - D_0 = K[L]_{(о)}^s [NO_3^-]_{(в)}^n [RA]_{(о)}^p [RNO_3]_{(о)}^{-p}. \quad (2)$$

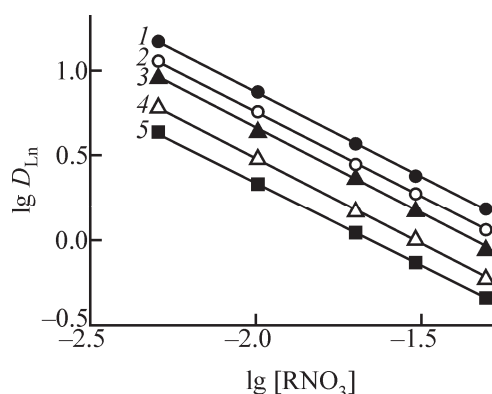


Рис. 4. Зависимость коэффициентов распределения Pr (1), Eu (2), Tb (3), Ho (4) и Tm (5) от концентрации Oct₃MeNNO₃ в дихлорэтано, содержащем 0.05 моль/л КМФО и 0.1 моль/л Oct₃MeNTf₂N, при экстракции из растворов 3 моль/л HNO₃.

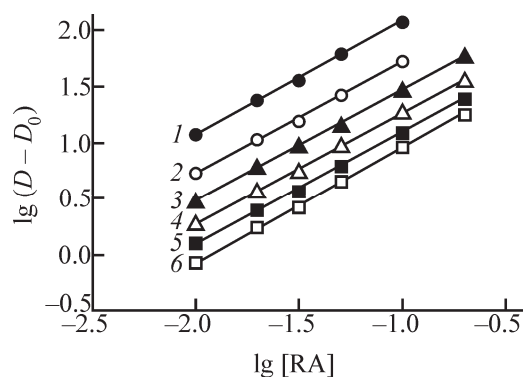


Рис. 5. Зависимость коэффициентов распределения Th (1), U (2), Eu (3), Dy (4), Er (5) и Yb (6) от концентрации Oct₃MeNTf₂N в дихлорэтано, содержащем 0.05 (3–6), 0.01 (2) или 0.005 (1) моль/л КМФО, при экстракции из растворов 3 моль/л HNO₃.

Выражение (2) в логарифмической форме было использовано для определения стехиометрических коэффициентов s и p при экстракции РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) из азотнокислых растворов. При постоянной концентрации КМФО в органической фазе тангенс угла наклона зависимости $\lg(D - D_0) - \lg[RA]$ близок к 1 (рис. 5), что соответствует переходу РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) в органическую фазу в виде комплексов с соотношением $M^{n+} : Tf_2N^- = 1 : 1$.

Стехиометрическое соотношение РЗЭ(III) : L в комплексах, экстрагируемых в присутствии ИЖ, близко к 1 : 3 (рис. 6), тогда как в отсутствие ИЖ КМФО извлекает РЗЭ(III) из азотнокислых растворов в виде комплексов с соотношением РЗЭ(III) : L = 1 : 2 и 1 : 3 [29]. Повышение сольватного числа в системе с ИЖ связано со слабой координирующей способностью ионов Tf₂N⁻ [29], которые находятся, по-видимому, во внешней координационной сфере экстрагируемого комплекса LnL₃(NO₃)₂(Tf₂N). В отсутствие ИЖ ионы РЗЭ(III) экстрагируются раство-

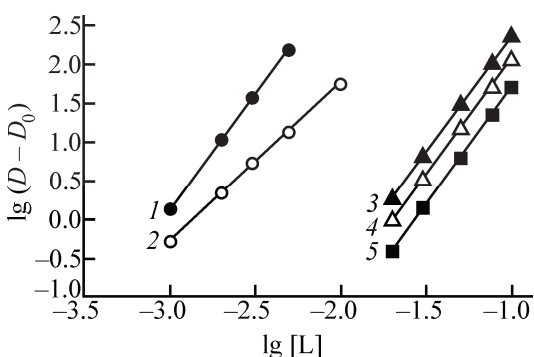


Рис. 6. Зависимость коэффициентов распределения U (1), Th (2), Eu (3), Ho (4) и Lu (5) от концентрации КМФО в дихлорэтано, содержащем 0.1 моль/л $\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$, при экстракции из растворов 3 моль/л HNO_3 .

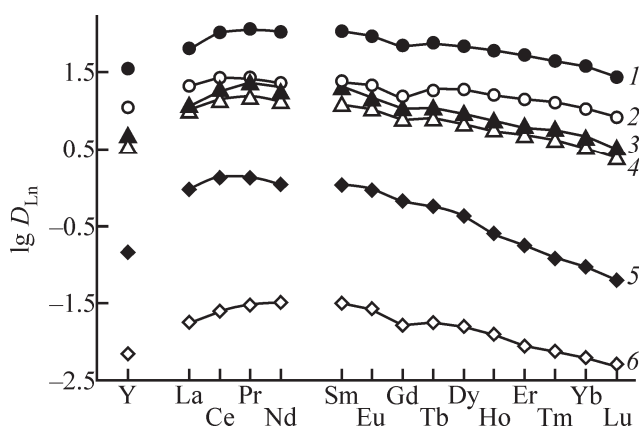


Рис. 7. Экстракция РЗЭ(III) и Y(III) из растворов 3 моль/л HNO_3 растворами 0.05 моль/л КМФО в нитробензоле (1), дихлорэтано (3) и *o*-ксилоле (4), содержащими 0.05 моль/л $\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$, и растворами КМФО в нитробензоле (2), дихлорэтано (5) и *o*-ксилоле (6) без добавок.

рами КМФО в виде координационно-сольватированных нитратов $\text{LnL}_q(\text{NO}_3)_3$ ($q = 2, 3$) [30], в которых ионы NO_3^- участвуют в координации ионов Ln^{3+} [31]. U(VI) и Th(IV) экстрагируются из азотнокислых растворов растворами КМФО в присутствии $\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$ в виде комплексов с соотношением $\text{M}^{n+} : \text{L} = 1 : 2$ и $1 : 3$ соответственно (рис. 6). При этом также наблюдается повышение сольватных чисел: из азотнокислых растворов U(VI) экстрагируется растворами КМФО в виде комплексов с соотношением U(VI) : L = 1 : 1 и 1 : 2 [2], а Th(IV) – с соотношением Th(IV) : L = 1 : 2 [32].

Природа органического растворителя существенно влияет на экстракцию РЗЭ(III) растворами КМФО. Увеличение полярности органического растворителя и его сольватирующей способности способствует увеличению D_{Ln} [33, 34]. При экстракции РЗЭ(III) смесями КМФО и $\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$ также наблюдается увеличение D_{Ln} в ряду *o*-ксилол < дихлорэтан < нитробензол (рис. 7) по мере увеличения

полярности органического растворителя и его сольватирующей способности. Однако в системе с $\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$ увеличение D_{Ln} в этом ряду менее выражено, чем при экстракции растворами КМФО в отсутствие ИЖ (рис. 7). Это может быть связано с более высокой гидрофобностью комплексов $\text{LnL}_3 \cdot (\text{NO}_3)_2(\text{Tf}_2\text{N})$ по сравнению с таковой координационно-сольватированных нитратов $\text{LnL}_q(\text{NO}_3)_3$ ($q = 2, 3$).

Величина синергетического эффекта увеличивается по мере снижения полярности органического растворителя. Так, при экстракции Eu(III) смесями КМФО и $\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$ величина S возрастает в ряду нитробензол (4.5) < дихлорэтан (15.5) < *o*-ксилол (407). Подобная тенденция наблюдалась также при экстракции РЗЭ(III) смесями хелатообразующих экстрагентов и нейтральных фосфорорганических соединений [35–37].

Представленные данные показали, что эффективность экстракции РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) из азотнокислых растворов растворами КМФО значительно возрастает в присутствии бис[(трифторметил)сульфонил]имидов ЧАО. Величина синергетического эффекта уменьшается с ростом гидрофобности катиона ИЖ. Однако использование гидрофобной ИЖ $\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$ позволяет существенно снизить потери ИЖ в процессе экстракции и значительно упростить процесс реэкстракции экстрагированных ионов металлов.

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

Список литературы

- [1] Розен А. М., Крупнов Б. В. // Успехи химии. 1996. Т. 65, N 11. С. 1052–1079.
- [2] Чмутова М. К., Литвина М. Н., Прибылова Г. А. и др. // Радиохимия. 1999. Т. 41, N 4. С. 331–335.
- [3] Мясоедова Г. В. // Рос. хим. журн. 2005. Т. 49, N 2. С. 72–75.
- [4] Romanovskiy V. N., Smirnov I. V., Babain V. A. et al. // Solvent Extr. Ion Exch. 2001. Vol. 19, N 1. P. 1–21.
- [5] Chmutova M. K., Litvina M. N., Nesterova N. P. et al. // Solvent Extr. Ion Exch. 1992. Vol. 10. P. 439–458.
- [6] Смирнов И. В. // Радиохимия. 2007. Т. 49, N 1. С. 40–49.
- [7] Visser A. E., Swatloski R. P., Reichert W. M. et al. // Ind. Eng. Chem. Res. 2000. Vol. 39. P. 3596–3604.
- [8] Koel M. // Crit. Rev. Anal. Chem. 2005. Vol. 35. P. 177–192.
- [9] Zhao H., Xia S., Ma P. // J. Chem. Technol. Biotechnol. 2005. Vol. 80. P. 1089–1096.
- [10] Dietz M. L. // Sep. Sci. Technol. 2006. Vol. 41. P. 2047–2063.
- [11] Nakashima K., Kubota F., Maruyama T., Goto M. // Anal. Sci. 2003. Vol. 19. P. 1097–1098.
- [12] Visser A. E., Rogers R. D. // J. Solid State Chem. 2003. Vol. 171. P. 109–113.
- [13] Kolarik Z. // Solvent Extr. Ion Exch. 2013. Vol. 31. P. 24–60.
- [14] Kubota F., Baba Y., Goto M. // Solvent Extr. Res. Dev. Jpn. 2012. Vol. 19. P. 17–28.
- [15] Billard I. // Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. 2013. Vol. 43, Ch. 256. P. 213–273.

- [16] Туранов А. Н., Карандашев В. К., Баулин В. Е. // Радиохимия. 2008. Т. 50, N 3. С. 229–235.
- [17] Туранов А. Н., Карандашев В. К., Яркевич А. Н. // Радиохимия. 2013. Т. 55, N 4. С. 314–318.
- [18] Туранов А. Н., Карандашев В. К., Баулин В. Е., Носенко С. В. // Радиохимия. 2010. Т. 52, N 5. С. 415–419.
- [19] Bell T. J., Ikeda Y. // Dalton Trans. 2011. Vol. 40. P. 10125–10130.
- [20] Туранов А. Н., Карандашев В. К., Харитонов А. В. и др. // ЖОХ. 1999. Т. 69, N 7. С. 1109–1115.
- [21] Туранов А. Н., Карандашев В. К., Баулин В. Е., Цветков Е. Н. // ЖНХ. 1995. Т. 40, N 11. С. 1926–1930.
- [22] Nagawara H., Suzuki H., Tachimori S. et al. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2001. Vol. 3. P. 2509–2517.
- [23] Rais J., Tachimori S. // J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett. 1994. Vol. 188, N 2. P. 157–162.
- [24] Dai S., Ju Y. H., Barnes C. E. // J. Chem. Soc., Dalton Trans. 1999. P. 1201–1202.
- [25] Яцимирский К. Б., Костромина Н. А., Шека З. А. и др. Химия комплексных соединений редкоземельных элементов. Киев: Наук. думка, 1966. 494 с.
- [26] Чмутова М. К., Иванова Л. А., Кочеткова Н. Е. и др. // Радиохимия. 1995. Т. 37, N 5. С. 422–426.
- [27] Mazan V., Billard I., Papaiconomou N. // RSC Adv. 2014. Vol. 4. P. 13371–13384.
- [28] Atanassova M., Kurteva V. // RSC Adv. 2016. Vol. 6. P. 11303–11324.
- [29] Литвина М. Н., Чмутова М. К., Мясоедов Б. Ф., Кабачник М. И. // Радиохимия. 1996. Т. 38, N 6. С. 525–530.
- [30] Vinnemans K. // Chem. Rev. 2007. Vol. 107. P. 2593–2614.
- [31] Шарова Е. В., Артюшин О. И., Нелюбина Ю. В. и др. // Изв. АН. Сер. хим. 2008. N 9. С. 1856–1862.
- [32] Туранов А. Н., Карандашев В. К., Яркевич А. Н. // Радиохимия. 2018. Т. 60, N 2. С. 153–158.
- [33] Розен А. М., Никифоров А. С., Николотова З. И., Карташева Н. А. // ДАН СССР. 1986. Т. 286, N 3. С. 667–670.
- [34] Шадрин А. Ю., Бабаин В. А., Киселева Р. Н. // Радиохимия. 1993. Т. 35, N 1. С. 45–50.
- [35] Akiba K., Wada M., Kanno T. // J. Inorg. Nucl. Chem. 1981. Vol. 43. P. 1031–1034.
- [36] Bond A. H., Dietz M. L., Chiarizia R. // Ind. Eng. Chem. Res. 2000. Vol. 39. P. 3442–3464.
- [37] Petrova M. A., Lachkova V. I., Vassilev N. G., Varbanov S. G. // Ind. Eng. Chem. Res. 2010. Vol. 49. P. 6189–6195.