

ЭКСТРАКЦИЯ ЛАНТАНИДОВ(III) ИЗ АЗОТНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ ДИОКСИДОМ ТЕТРАФЕНИЛМЕТИЛЕНДИФОСФИНА В ПРИСУТСТВИИ БИС[(ТРИФТОРМЕТИЛ)СУЛЬФОНИЛ]ИМИДОВ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ АММОНИЕВЫХ ОСНОВАНИЙ

© 2020 г. А. Н. Туранов^{а, *}, В. К. Карандашев^б

^аИнститут физики твердого тела РАН, ул. Академика Осипяна, 2, Черноголовка, Московская обл., 142432 Россия

^бИнститут проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН,
ул. Академика Осипяна, 6, Черноголовка, Московская обл., 142432 Россия

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

Поступила в редакцию 19.07.2019 г.

После доработки 08.08.2019 г.

Принята к публикации 28.08.2019 г.

Изучено межфазное распределение La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb и Lu между водными растворами HNO_3 и растворами диоксида тетрафенилметиленидифосфина в 1,2-дихлорэтане, содержащими ионные жидкости с анионом *bis*[(трифторметил)сульфонил]имида и катионами четвертичных аммониевых оснований. Установлено, что экстракция ионов металлов значительно возрастает в присутствии ионных жидкостей в органической фазе. Определена стехиометрия извлекаемых комплексов, рассмотрено влияние концентрации HNO_3 в водной фазе и природы катионной части ионной жидкости на эффективность извлечения ионов металлов в органическую фазу.

Ключевые слова: экстракция, синергизм, лантаниды, диоксид тетрафенилметиленидифосфина, ионные жидкости

DOI: 10.31857/S0044457X20010183

ВВЕДЕНИЕ

В основе концепции замкнутого ядерного топливного цикла, предусматривающей переработку отработанного ядерного топлива, лежит селективное выделение содержащихся в нем *f*-элементов, необходимых для развития ряда отраслей промышленности и ядерной медицины [1]. Экстракционные методы широко используются для извлечения, концентрирования и разделения актинидов и лантанидов. Высокой экстракционной способностью по отношению к этим элементам обладают полидентатные нейтральные фосфорорганические соединения [2–4], в том числе замещенные диоксиды метиленидифосфинов [5, 6]. Замена в молекулах этих соединений алкильных заместителей при атомах фосфора на арильные приводит к резкому возрастанию экстракционной способности по отношению к актинидам и лантанидам в азотнокислых средах, что связано с проявлением эффекта аномального арильного упрочнения экстрагируемых комплексов [7].

В последнее время возрос интерес к использованию ионных жидкостей (ИЖ) в экстракционной практике концентрирования и разделения органических и неорганических соединений в ка-

честве несмешивающейся с водой фазы [8–11]. Было показано, что экстракция актинидов и лантанидов(III) растворами диарил(диалкилкарбамоилметил)фосфиноксидов (КМФО) в ИЖ гексафторфосфатах и *bis*[(трифторметил)сульфонил]имидах 1-алкил-3-метилимидазолиев значительно возрастает по сравнению с экстракцией растворами КМФО в традиционных органических растворителях [12, 13]. Отмечено, что в таких системах для количественного извлечения ионов металлов не требуется значительного избытка ионов NO_3^- в водной фазе, что является необходимым условием экстракции этим экстрагентом в традиционных органических растворителях. Примеры использования ИЖ в процессах извлечения и концентрирования лантанидов(III) и актинидов приведены в обзорах [14–20]. Установлено, что для эффективного извлечения лантанидов(III) из растворов HNO_3 и HCl достаточно даже относительно небольшой концентрации ИЖ в органическом растворителе, содержащем нейтральные донорно-активные экстрагенты [21–24]. Это позволяет рассматривать ИЖ как активный компонент синергетической смеси.

Использование *bis*[(трифторметил)сульфонил]имида в качестве анионного компонента ИЖ определяется его высокой гидрофобностью и гидролитической устойчивостью в азотнокислых средах по сравнению с анионом гексафторфосфата [14]. В большинстве опубликованных работ по экстракции ионов металлов в качестве ИЖ использовали в основном ИЖ на основе катионов 1-алкил-3-метилимидазолия. В последнее время вырос интерес к использованию в экстракционной практике ИЖ с катионами четвертичных аммониевых оснований, что связано с их большей доступностью и меньшей токсичностью [25].

Цель настоящей работы – исследование влияния природы катионной части ИЖ на эффективность экстракции лантанидов(III) из азотнокислых растворов растворами диоксида тетрафенилметилendifосфина в органических растворителях. Для этого рассмотрено межфазное распределение ионов Ln(III) между растворами HNO_3 и органической фазой, содержащей диоксид тетрафенилметилendifосфина $\text{Ph}_2\text{P}(\text{O})\text{CH}_2\text{P}(\text{O})\text{Ph}_2$ и *bis*[(трифторметил)сульфонил]имида тетраэтиламмония ($[\text{Et}_4\text{N}][\text{Tf}_2\text{N}]$), триэтилбензиламмония ($[\text{Et}_3\text{BnN}][\text{Tf}_2\text{N}]$), тетрабутиламмония ($[\text{Bu}_4\text{N}][\text{Tf}_2\text{N}]$) и триоктилметиламмония ($[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}]$).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Диоксид тетрафенилметилendifосфина (ТФМДФО) получен согласно [26]. Ионные жидкости $[\text{Et}_4\text{N}][\text{Tf}_2\text{N}]$, $[\text{Et}_3\text{BnN}][\text{Tf}_2\text{N}]$, $[\text{Bu}_4\text{N}][\text{Tf}_2\text{N}]$ и $[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}]$ получены по методике [27] обменной реакцией литиевой соли *bis*[(трифторметил)сульфонил]имида (Sigma-Aldrich) с бромидом тетраэтиламмония, триэтилбензиламмония, тетрабутиламмония и хлоридом триоктилметиламмония (Aliquat 336, Sigma-Aldrich) соответственно. В качестве органического растворителя использовали 1,2-дихлорэтан марки “х. ч.” без дополнительной очистки. Растворы ТФМДФО и ИЖ в органическом растворителе готовили по точным навескам. Концентрации ТФМДФО и ИЖ изменялись в диапазоне 3×10^{-4} – 3×10^{-3} и 0.001–0.1 моль/л соответственно.

Распределение ионов Ln(III) в экстракционных системах изучали на модельных растворах 0.03–7.0 моль/л HNO_3 . Исходные водные растворы с концентрацией каждого из Ln(III) 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 $22 \pm 1^\circ\text{C}$ и соотношении объемов органической и водной

фаз 1 : 1. Контакт фаз осуществляли на роторном аппарате при перемешивании со скоростью 60 об./мин в течение 1 ч. Предварительно установлено, что этого времени достаточно для установления постоянных значений коэффициентов распределения (D).

Содержание лантанидов(III) 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 элементов в органической фазе определяли по разнице их исходных и равновесных концентраций в водной фазе. Коэффициенты распределения лантанидов (D_{Ln}) 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 Jarrel Ash, США) по содержанию серы. Концентрацию HNO_3 в равновесных водных фазах определяли потенциометрическим титрованием раствором NaOH .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что растворы исследованных ИЖ в дихлорэтане не экстрагируют Ln(III) из азотнокислых растворов (величины D_{Ln} не превышают 10^{-2}). Однако при экстракции Ln(III) смесями ТФМДФО и ИЖ в дихлорэтане значительно увеличивается извлечение Ln(III) в органическую фазу (рис. 1). Наблюдаемый синергетический эффект может быть связан с вхождением гидрофобных анионов Tf_2N^- в состав экстрагируемых комплексов в качестве противоионов сольватированных катионов Ln(III), приводящим к увеличению их гидрофобности по сравнению с координационно-сольватированными нитратами Ln(III). Протеканием подобного процесса объясняется значительное увеличение экстракции Ln(III) и Am(III) растворами нейтральных экстрагентов в присутствии гидрофобных пикрат- [28] и тетракис[3,5-*bis*(трифторметил)фенил]борат-анионов [29] или анионов хлорированного дикарболлида кобальта [30].

Величина синергетического эффекта (S) определяется как $S = D/(D_1 + D_2)$, где D – коэффициент распределения Ln(III) при экстракции смесью ТФМДФО и ИЖ, D_1 и D_2 – коэффициенты распределения при экстракции индивидуальными компонентами смеси в таких же условиях. В исследованных системах величина S увеличивается в ряду ИЖ $[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}] < [\text{Bu}_4\text{N}][\text{Tf}_2\text{N}] < [\text{Et}_3\text{BnN}][\text{Tf}_2\text{N}] < [\text{Et}_4\text{N}][\text{Tf}_2\text{N}]$ (рис. 2, 3) по ме-

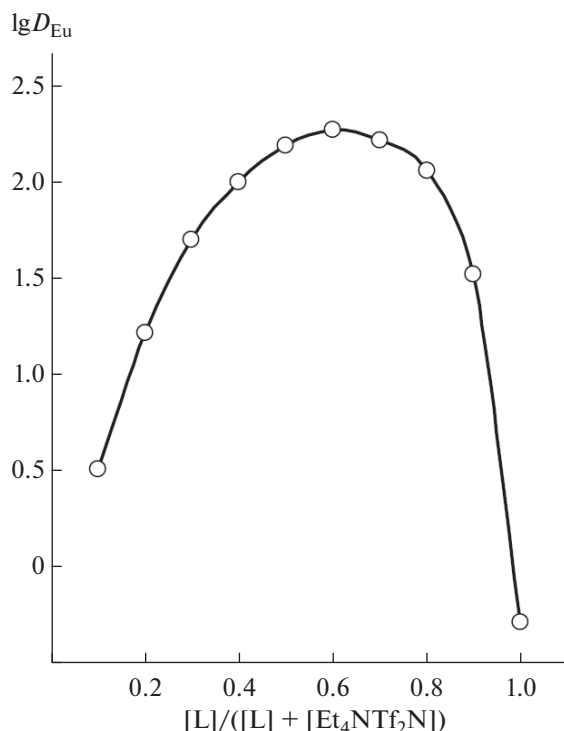


Рис. 1. Экстракция Eu(III) из растворов 1 моль/л HNO_3 изомольными смесями ТФМДФО и $[\text{Et}_4\text{N}][\text{Tf}_2\text{N}]$ в дихлорэтане в зависимости от их исходного мольного соотношения в органической фазе. $[\text{ТФМДФО}] + [\text{Et}_4\text{NTf}_2\text{N}] = 0.002$ моль/л.

ре снижения гидрофобности катиона ИЖ. Ранее отмечалось снижение эффективности экстракции ионов металлов растворами нейтральных донорно-активных экстрагентов в ИЖ на основе катионов 1-алкил-3-метилимидазолия по мере увеличения их гидрофобности при увеличении длины алкильной цепочки в катионе ИЖ [31].

При экстракции из раствора 1 моль/л HNO_3 величины S увеличиваются в ряду лантанидов(III) от La(III) до Lu(III) (рис. 2) по мере уменьшения ионных радиусов ионов Ln^{3+} и увеличения их энергии гидратации [32]. По-видимому, замещение в экстрагируемом комплексе анионов NO_3^- на более гидрофобные Tf_2N^- оказывает большее влияние на экстракцию более гидратированных ионов РЗЭ(III). Это приводит к снижению коэффициента разделения La/Lu ($\beta_{\text{La/Lu}} = D_{\text{La}}/D_{\text{Lu}}$) от 60.3 при экстракции раствором ТФМДФО до 20.4 при экстракции этим экстрагентом в присутствии $[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}]$ в органической фазе (рис. 2).

Присутствие ИЖ в органической фазе существенно изменяет характер зависимости эффективности экстракции Ln(III) растворами ТФМДФО от концентрации HNO_3 в водной фазе (рис. 3). В присутствии менее гидрофобных ИЖ

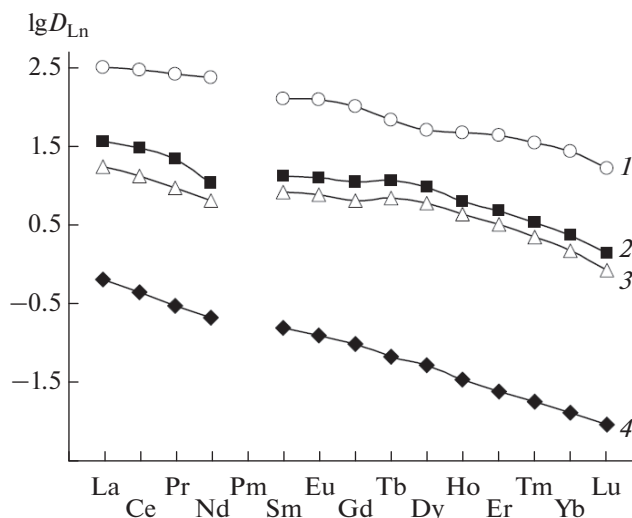


Рис. 2. Экстракция лантанидов(III) из растворов 1 моль/л HNO_3 растворами 0.001 моль/л ТФМДФО в дихлорэтане, содержащем 0.01 моль/л $[\text{Et}_3\text{BnN}][\text{Tf}_2\text{N}]$ (1), $[\text{Bu}_4\text{N}][\text{Tf}_2\text{N}]$ (2), $[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}]$ (3), и раствором ТФМДФО в дихлорэтане (4).

$[\text{Et}_4\text{N}][\text{Tf}_2\text{N}]$ и $[\text{Et}_3\text{BnN}][\text{Tf}_2\text{N}]$ наблюдается снижение D_{Eu} с ростом $[\text{HNO}_3]$, которое отмечалось ранее и при экстракции растворами ТФМДФО и КМФО в присутствии ИЖ с катионом 1-бутил-3-метилимидазолия (bmimTf_2N) [21–24]. Причины такого характера зависимости D – $[\text{HNO}_3]$ в системах с ИЖ обсуждались в предыдущих работах [33, 34]. Другой характер зависимости D_{Eu} – $[\text{HNO}_3]$ наблюдается в системах с более гидрофобными ИЖ $[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}]$ и $[\text{Bu}_4\text{N}][\text{Tf}_2\text{N}]$ (рис. 3). В этом случае D_{Eu} возрастает с увеличением $[\text{HNO}_3]$ до 1 моль/л, что может быть связано с неполным замещением в экстрагируемых комплексах Ln(III) анионов NO_3^- на гидрофобные ионы Tf_2N^- , т.е. участием ионов NO_3^- в образовании экстрагируемых комплексов в таких системах. Снижение D_{Eu} с дальнейшим ростом $[\text{HNO}_3]$ связано с уменьшением концентрации свободного экстрагента в органической фазе вследствие соэкстракции HNO_3 и HTf_2N . Снижение D_{Eu} с ростом $[\text{HNO}_3]$ наиболее заметно в случае менее гидрофобных ИЖ. Из данных рис. 3 видно, что увеличение $[\text{HNO}_3]$ от 2 до 5 моль/л сопровождается уменьшением D_{Eu} в 85, 26 и 16 раз для систем с $[\text{Et}_3\text{BnN}][\text{Tf}_2\text{N}]$, $[\text{Bu}_4\text{N}][\text{Tf}_2\text{N}]$ и $[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}]$ соответственно. Это связано с тем, что концентрация ионов Tf_2N^- в водной фазе увеличивается по мере снижения гидрофобности катиона ИЖ, т.е. соэкстракция HTf_2N оказывает менее заметное влияние на экстракцию ионов металлов в присутствии более гидрофобных ИЖ. Отметим, что в отсутствие ИЖ

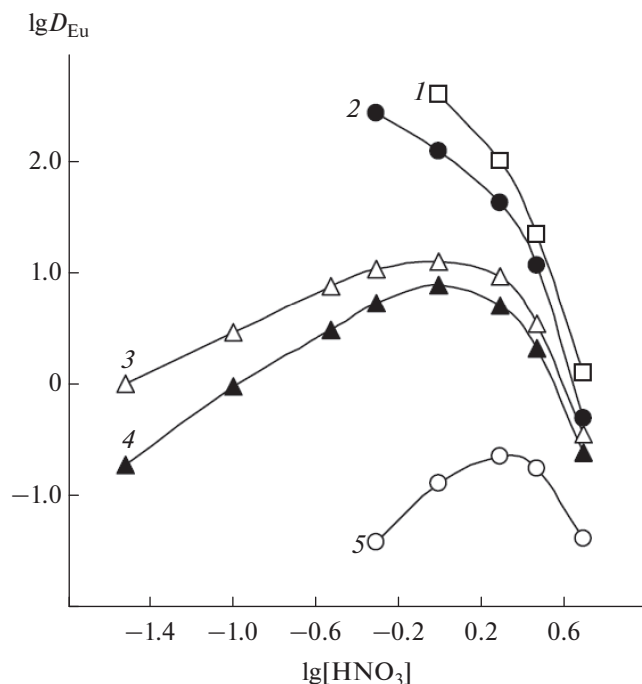


Рис. 3. Зависимость коэффициентов распределения Eu(III) от концентрации HNO_3 в равновесной водной фазе при экстракции растворами 0.001 моль/л ТФМДФО в дихлорэтано, содержащем 0.002 моль/л $[\text{Et}_4\text{N}][\text{Tf}_2\text{N}]$ (1), 0.01 моль/л $[\text{Et}_3\text{BnN}][\text{Tf}_2\text{N}]$ (2), $[\text{Bu}_4\text{N}][\text{Tf}_2\text{N}]$ (3), $[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}]$ (4), и в дихлорэтане (5).

увеличение $[\text{HNO}_3]$ от 2 до 5 моль/л при экстракции раствором ТФМДФО в дихлорэтано сопровождается снижением D_{Eu} только в 3.7 раза.

Известно, что процесс экстракции ионов металлов нейтральными экстрагентами в присутствии ИЖ сопровождается заметным переходом ионов ИЖ в водную фазу [35]. Величины коэффициентов распределения иона Tf_2N^- между растворами 0.1 моль/л ИЖ в дихлорэтано и раствором 1 моль/л HNO_3 возрастают в ряду $\text{Et}_4\text{NTf}_2\text{N}$ (5.0) < $\text{Et}_3\text{BnNTf}_2\text{N}$ (19.8) < $\text{Bu}_4\text{NTf}_2\text{N}$ (302) < $\text{Oct}_3\text{MeNTf}_2\text{N}$ (>1000) по мере увеличения гидрофобности катионной части этих ИЖ. В такой же последовательности снижаются потери ИЖ в процессе экстракции.

Несмотря на то, что в системе с $[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}]$ эффект синергизма при экстракции лантанидов(III) раствором ТФМДФО из азотнокислых растворов проявляется в меньшей степени, чем в системах с менее гидрофобными $[\text{Et}_4\text{N}][\text{Tf}_2\text{N}]$ и $[\text{Et}_3\text{BnN}][\text{Tf}_2\text{N}]$, а также *buc*[(трифторметил)сульфонил]имидом 1-бутил-3-метилимидазолия (*bmimTf}_2\text{N}*) [21, 22], использование $[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}]$ позволяет существенно снизить потери этой ИЖ в процессе экстракции. Кроме того, снижение коэффициентов распределения

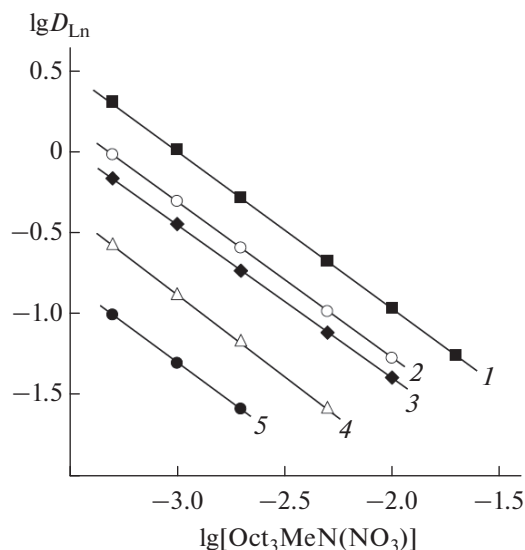
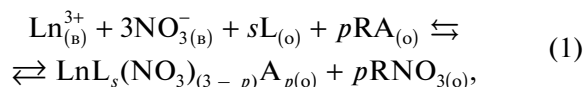


Рис. 4. Зависимость коэффициентов распределения La (1), Sm (2), Dy (3), Tm (4) и Lu (5) от концентрации $[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{NO}_3]$ в дихлорэтано, содержащем 0.001 моль/л ТФМДФО и 0.01 моль/л $[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}]$, при экстракции из растворов 1 моль/л HNO_3 .

ионов металлов с уменьшением $[\text{HNO}_3]$ (рис. 3) позволяет значительно упростить процесс их реэкстракции. После экстракции Ln(III) из раствора 3 моль/л HNO_3 растворами 0.05 моль/л ТФМДФО и 0.01 моль/л $[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}]$ или $[\text{Et}_3\text{BnN}][\text{Tf}_2\text{N}]$ в дихлорэтано была проведена реэкстракция Ln(III) водой. В системе с $[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}]$ степень реэкстракции Ln(III) превышает 90%, тогда как в системе с $[\text{Et}_3\text{BnN}][\text{Tf}_2\text{N}]$ Ln(III) практически не переходит в водную фазу. Поэтому далее рассмотрены равновесия при межфазном распределении Ln(III) между растворами HNO_3 и органической фазой, содержащей ТФМДФО и $[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}]$.

Процесс синергетической экстракции лантанидов(III) из азотнокислых растворов растворами ТФМДФО (L) в присутствии гидрофобной ИЖ $[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}]$ (RA) может быть описан уравнением:



где символы (в) и (о) относятся к компонентам водной и органической фаз соответственно. Как следует из этого уравнения, экстракция ионов металлов смесью ТФМДФО и $[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}]$ из азотнокислых растворов сопровождается образованием нитрата триоктилметиламмония (RNO_3) в органической фазе. Поэтому добавка RNO_3 в органическую фазу, содержащую смесь ТФМДФО и

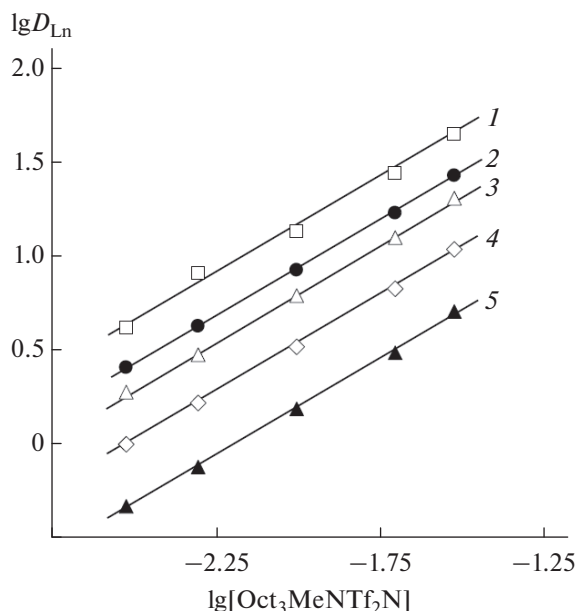


Рис. 5. Зависимость коэффициентов распределения Ce (1), Eu (2), Dy (3), Er (4) и Yb (5) от концентрации $[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}]$ в дихлорэтано, содержащем 0.001 моль/л ТФМДФО, при экстракции из растворов 1 моль/л HNO_3 .

$[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}]$, должна приводить к сдвигу равновесия (1) влево, т.е. к уменьшению экстракции ионов металлов. Действительно, при постоянных концентрациях ТФМДФО и $[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}]$ в органической фазе угловой наклон зависимости $\lg D_{\text{Ln}} - \lg [\text{RNO}_3]$ близок к -1 (рис. 4). При постоянной концентрации ТФМДФО в органической фазе угловой наклон зависимости $\lg D_{\text{Ln}} - \lg [\text{RA}]$ близок к 1 (рис. 5), что соответствует переходу Ln(III) в органическую фазу в виде комплексов с соотношением $\text{Ln}^{3+} : \text{Tf}_2\text{N}^- = 1 : 1$.

Стехиометрическое соотношение $\text{Ln(III)} : \text{L}$ в комплексах, экстрагируемых в присутствии ИЖ, близко к $1 : 3$ (рис. 6), тогда как в отсутствие ИЖ ионы Ln(III) экстрагируются растворами ТФМДФО из азотнокислых растворов в основном в виде комплексов с соотношением $\text{Ln(III)} : \text{L} = 1 : 2$ [36]. Повышение сольватного числа в системе с ИЖ связано со слабой координирующей способностью ионов Tf_2N^- [37], которые находятся, по-видимому, во внешней координационной сфере экстрагируемого комплекса $\text{LnL}_3(\text{NO}_3)_2(\text{Tf}_2\text{N})$. Увеличение числа молекул экстрагента, участвующих в образовании экстрагируемых комплексов, приводит к увеличению их гидрофобности, что способствует повышению эффективности экстракции ионов металлов в органическую фазу.

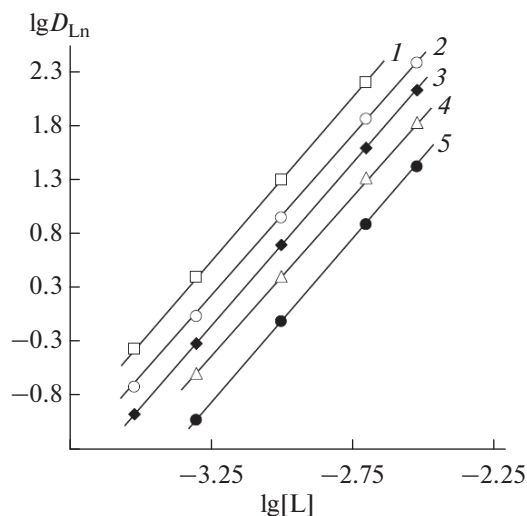


Рис. 6. Зависимость коэффициентов распределения La (1), Eu (2), Ho (3), Tm (4) и Lu (5) от концентрации ТФМДФО в дихлорэтано, содержащем 0.01 моль/л $[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}]$, при экстракции из растворов 1 моль/л HNO_3 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что эффективность экстракции лантанидов(III) из азотнокислых растворов растворами ТФМДФО значительно возрастает в присутствии бис[(трифторметил)сульфонил]имидов четвертичного аммониевого основания. Величина синергетического эффекта уменьшается с ростом гидрофобности катиона ИЖ. Однако использование гидрофобной ИЖ $[\text{Oct}_3\text{MeN}][\text{Tf}_2\text{N}]$ позволяет существенно снизить потери ИЖ в процессе экстракции и значительно упростить процесс реэкстракции экстрагированных ионов металлов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания 2019 г. ИФТТ РАН и ИПТМ РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Myasoedov B.F., Kalmykov S.N., Kulyako Yu.M. et al. // *Geochem. Int.* 2016. V. 54. № 13. P. 1156. <https://doi.org/10.1134/S0016702916130115>
2. Alyapychiev M.Yu., Babain V.A., Ustynyuk Yu.A. // *Russ. Chem. Rev.* 2016. V. 85. № 9. P. 943. <https://doi.org/10.1070/RCR4588>
3. Leoncini A., Huskens J., Verboom W. // *Chem. Soc. Rev.* 2017. V. 46. P. 7229. <https://doi.org/10.1039/C7CS00574A>

4. Wilson A.M., Bailey P.J., Tasker P.A. // Chem. Soc. Rev. 2014. V. 43. P. 123.
<https://doi.org/10.1039/C3CS60275C>
5. Розен А.М., Волк В.И., Вахрушин А.Ю. и др. // Радиохимия. 1999. Т. 41. № 3. С. 205.
6. Rozen A.M., Krupnov B.V. // Russ. Chem. Rev. 1996. V. 65. № 11. P. 973.
<https://doi.org/10.1070/RC1996v065n11ABEH000241>
7. Розен А.М., Николотова З.И., Карташева Н.А., Юдина К.С. // ДАН СССР. 1975. Т. 222. № 5. С. 1151.
8. Visser A.E., Swatloski R.P., Reichert W.M. et al. // Ind. Eng. Chem. Res. 2000. V. 39. P. 3596.
9. Koel M. // Crit. Rev. Anal. Chem. 2005. V. 35. P. 177.
<https://doi.org/10.1080/10408340500304016>
10. Zhao H., Xia S., Ma P. // J. Chem. Technol. Biotechnol. 2005. V. 80. P. 1089.
11. Dietz M.L. // Sep. Sci. Technol. 2006. V. 41. P. 2047.
12. Nakashima K., Kubota F., Maruyama T. et al. // Anal. Sci. 2003. V. 19. P. 1097.
<https://doi.org/10.2116/analsci.19.1097>
13. Visser A.E., Rogers R.D. // J. Solid State Chem. 2003. V. 171. P. 109.
14. Kolarik Z. // Solvent Extr. Ion Exch. 2013. V. 31. P. 24.
<https://doi.org/10.1080/07366299.2012.700589>
15. Kubota F., Baba Y., Goto M. // Solvent Extr. Res. Dev. Jpn. // 2012. V. 19. P. 17.
16. Billard I. // Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. 2013. V. 43. Ch. 256. P. 213.
17. Shkrob I.A., Marin T.W., Jensen M.P. // Ind. Eng. Chem. Res. 2014. V. 53. P. 3641.
<https://doi.org/10.1021/ie4036719>
18. Mohapatra P.K. // Chem. Prod. Proc. Model. 2015. V. 10. P. 135.
19. Gupta N.K. // J. Molec. Liq. 2018. V. 269. P. 72.
20. Hawkins C.A., Momen M.A., Dietz M.L. // Sep. Sci. Technol. 2018. V. 53. P. 1820.
<https://doi.org/10.1080/01496395.2017.1302478>
21. Turanov A.N., Karandashev V.K., Baulin V.E. // Russ. J. Inorg. Chem. 2008. V. 53. № 6. P. 970. [Туранов А.Н., Карандашев В.К., Баулин В.Е. // Журн. неорганической химии. 2008. Т. 53. № 6. С. 1045.]
<https://doi.org/10.1134/S0036023608060272>
22. Turanov A.N., Karandashev V.K., Baulin V.E. // Radiochemistry. 2008. V. 50. № 3. P. 266. [Туранов А.Н., Карандашев В.К., Баулин В.Е. // Радиохимия. 2008. Т. 50. № 3. С. 229.]
<https://doi.org/10.1134/S1066362208030090>
23. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Яркевич А.Н. // Радиохимия. 2013. Т. 55. № 4. С. 314.
24. Turanov A.N., Karandashev V.K., Yarkevich A.N. // Russ. J. Inorg. Chem. 2018. V. 63. № 3. P. 406. [Туранов А.Н., Карандашев В.К., Яркевич А.Н. // Журн. неорганической химии. 2018. Т. 63. № 3. С. 382.]
<https://doi.org/10.1134/S0036023618030221>
25. Bell T.J., Ikeda Y. // Dalton Trans. 2011. V. 40. P. 10125.
26. Чаузов В.А., Студнев Ю.Н., Изноткова М.Г., Фокин А.В. // Журн. общей химии. 1987. Т. 57. № 1. С. 54.
27. Bonhote P., Dias A.P., Papageorgiou N. et al. // Inorg. Chem. 1996. V. 35. P. 1168.
28. Naganawa H., Suzuki H., Tachimori S. et al. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2001. V. 3. P. 2509.
29. Suzuki H., Naganawa H., Tachimori S. // Phys. Chem. Chem. Phys. 2003. V. 5. P. 726.
30. Rais J., Tachimori S. // J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett. 1994. V. 188. № 2. P. 157.
31. Dai S., Ju Y.H., Barnes C.E. // J. Chem. Soc., Dalton Trans. 1999. P. 1201.
32. Яцимирский К.Б., Костромина Н.А., Шека З.А. и др. Химия комплексных соединений редкоземельных элементов. Киев: Наук. думка, 1966. 494 с.
33. Turanov A.N., Karandashev V.K., Baulin V.E. // Solvent Extr. Ion Exch. 2008. V. 26. P. 77.
<https://doi.org/10.1080/07366290801904871>
34. Turanov A.N., Karandashev V.K., Khvostikov V.A. // Solvent Extr. Ion Exch. 2017. V. 35. P. 461.
35. Gaillard C., Boltoeva M., Billard I. et al. // Chem. Phys. Chem. 2015. V. 16. P. 2653.
<https://doi.org/10.1002/cphc.201500283>
36. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Баулин В.Е. // Радиохимия. 2001. Т. 43. № 1. С. 66.
37. Binnemans K. // Chem. Rev. 2007. V. 107. P. 2593.
<https://doi.org/10.1021/cr050979c>