

ФИЗИКОХИМИЯ РАСТВОРОВ

УДК 542.61;546.65/66

ЭКСТРАКЦИЯ РЗЭ(III) ИЗ АЗОТНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ ДИЭТИЛ(2-((ДИФЕНИЛФОСФОРИЛ)МЕТОКСИ)-5-ЭТИЛФЕНИЛ)ФОСФОНАТОМ

© 2019 г. А. Н. Туранов^{1,*}, В. К. Карандашев^{2,3}, В. Е. Баулин^{4,5}, Д. В. Баулин⁵, В. А. Хвостиков²

¹Институт физики твердого тела РАН, ул. Академика Осипяна, 2, Черноголовка Московской обл., 142432 Россия

²Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН,
ул. Академика Осипяна, 6, Черноголовка Московской обл., 142432 Россия

³Национальный исследовательский технологический университет “МИСИС”,
Ленинский пр-т, 4, Москва, 119991 Россия

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

⁵Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,
Ленинский пр-т, 31, корп. 4, Москва, 119991 Россия

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

Поступила в редакцию 05.03.2019 г.

После доработки 23.03.2019 г.

Принята к публикации 13.05.2019 г.

Изучена экстракция микроколичеств РЗЭ(III) из азотнокислых растворов растворами диэтил(2-((дифенилфосфорил)метокси)-5-этилфенил)фосфоната (I) в дихлорэтаноле и ионной жидкости — бис[(трифторметил)сульфонил]имиде 1-бутил-3-метилимидазолия. Определена стехиометрия экстрагируемых комплексов, рассмотрено влияние концентрации HNO_3 в водной фазе на эффективность извлечения ионов металлов в органическую фазу. Установлено, что соединение I в дихлорэтаноле экстрагирует РЗЭ(III) менее эффективно, чем его структурные аналоги с фенильными или бутильными заместителями при атоме фосфора. Показано, что эффективность экстракции РЗЭ(III) соединением I из азотнокислых растворов значительно увеличивается в присутствии ионной жидкости в органической фазе.

Ключевые слова: экстракция, редкоземельные элементы(III), фосфорорганические соединения, ионные жидкости

DOI: 10.1134/S0044457X19100167

ВВЕДЕНИЕ

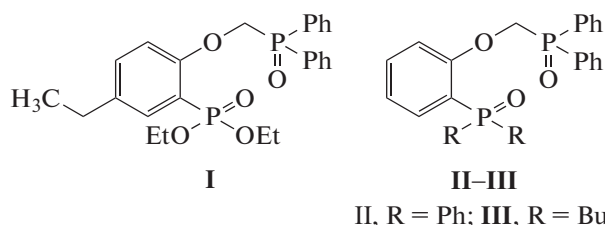
Экстракционные методы широко используются для извлечения, концентрирования и разделения редкоземельных элементов (РЗЭ) [1]. Изучение экстракционных свойств новых полифункциональных фосфорорганических соединений представляет интерес в связи с перспективами использования их в радиохимической и аналитической практике. Высокой экстракционной способностью по отношению к РЗЭ(III) обладают полидентатные нейтральные фосфорорганические соединения [2, 3], среди которых наиболее детально изучены замещенные диоксиды метилендифосфинов [4], оксиды (диалкилкарбамоилметил)диарилфосфинов (КМФО) [5] и их производные [6], N-дифенилфосфорил-N'-алкилмочевины [7], фосфорилированные каликсарены [8–12], фосфорилированные пиридин N-оксиды [13, 14], а также ациклические аналоги краун-эфиров — поданды с амидными [15–20] или фосфорильными [21–23] концевыми группами.

Экстракционная способность и селективность фосфорилсодержащих подандов (ФП) существенно зависят от длины полиэфирной цепи, структуры мостика между эфирным атомом кислорода и РО-группой, а также от природы заместителя при атомах фосфора [21–23]. В ряде случаев замена алкиленового мостика в молекулах диоксидов тетрафенилалкилендифосфинов на этиленгликолевые фрагменты приводит к повышению экстракционной способности соответствующих ФП по отношению к РЗЭ(III) [23]. Среди этих соединений диоксиды тетраарилзамещенных (o-фениленоксиметилен)дифосфинов обладают наиболее высокой экстракционной способностью по отношению к ионам актинидов и РЗЭ(III) [23], превосходя такую для КМФО. Замена в молекулах этих соединений арильных заместителей при атомах фосфора на алкильные приводит к резкому снижению экстракционной способности ФП по отношению к актинидам и РЗЭ в азотнокислых средах, что связано с прояв-

лением эффекта аномального арильного упрочнения (ЭААУ) экстрагируемых комплексов [24]. Экстракционные свойства ФП с алкоксигруппами при атомах фосфора изучены в значительно меньшей степени [25].

В последнее время вырос интерес к использованию ионных жидкостей (ИЖ) в процессах экстракционного концентрирования и разделения органических и неорганических соединений [26–29]. Экстракция РЗЭ(III) бидентатными нейтральными фосфорорганическими соединениями [30–32] и замещенными дигликолямидами [33–35] значительно возрастает в присутствии ИЖ – *bis*[(трифторметил)сульфонил]имидов 1-алкил-3-метилимидазолиев. В таких системах для количественного извлечения РЗЭ(III) не требуется значительного избытка ионов NO_3^- в водной фазе, что является условием экстракции этими экстрагентами в традиционных органических растворителях. Сведения о влиянии ИЖ на экстракцию ионов металлов ФП в литературе отсутствуют.

Цель настоящей работы – исследование влияния ИЖ на эффективность экстракции РЗЭ(III) из азотнокислых растворов соединений I. Для этого рассмотрены некоторые закономерности распределения РЗЭ(III) между водными растворами HNO_3 и растворами I в 1,2-дихлорэтаноле и ИЖ – *bis*[(трифторметил)сульфонил]имиде 1-бутил-3-метилимидазолия. Сопоставлены данные по экстракции РЗЭ(III) соединением I и его структурными аналогами с фенильными (II) и бутильными (III) заместителями при фосфорильной группе.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Диэтил(2-((дифенилфосфорил)метокси)-5-этилфенил)фосфонат (I) получен алкилированием диэтил(2-окси-5-этилфенил)фосфоната (дифенилфосфорил)-метилбензолсульфонатом в присутствии гидрида натрия в кипящем диоксане по описанной ранее методике [36]. Выход соединения I составил 69%, $t_{\text{пл}} = 89-91^\circ\text{C}$ (бензол–гексан).

	С	Н	Р
Найдено, %:	63.49, 63.15;	6.05, 6.32;	16.41, 16.67.
Для $\text{C}_{25}\text{H}_{30}\text{O}_5\text{P}_2$			
вычислено, %:	63.56;	6.40;	16.93.

Спектр ЯМР ^1H (CDCl_3 , δ , м. д.): 2.18 м (9H, $2\text{CH}_3\text{CH}_2\text{O} + \text{Ar}-\text{CH}_2\text{CH}_3$), 3.65 кв (2H, $\text{Ar}-\text{CH}_2\text{CH}_3$), 5.01 м (4H, $2\text{CH}_3\text{CH}_2\text{O}$), 5.82 д (2H, $^2J_{\text{H-P}} = 16$ Гц, $\text{OCH}_2\text{P}(\text{O})\text{Ph}_2$), 7.96 т (1H, $^3J_{\text{H-H}} = 7.3$ Гц, $\text{Ar}-\text{H}$), 8.30 т (1H, $^3J_{\text{H-H}} = 4.6$ Гц, $\text{Ar}-\text{H}$), 8.52м (6H, $\text{Ar}-\text{H}$), 8.76 д (1H, $^2J_{\text{H-P}} = 32$ Гц, $\text{P}(\text{O})\text{Ar}-\text{H}$), 9.04 м (4H, $\text{Ar}-\text{H}$). Спектр ЯМР ^{31}P (CDCl_3 , δ , м. д.): 18.55, 27.96.

В качестве органических разбавителей использовали 1,2-дихлорэтан марки “х. ч.” без дополнительной очистки и *bis*[(трифторметил)сульфонил]имид 1-бутил-3-метилимидазолия ($\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}$), синтезированный и очищенный по известной методике [37]. Растворы экстрагента готовили по точной навеске.

Исходные водные растворы РЗЭ(III) готовили растворением соответствующих нитратов в воде с последующим добавлением HNO_3 . Исходная концентрация ионов металлов составляла 2×10^{-6} моль/л. Контакт фаз осуществляли при комнатной температуре на ротаторном аппарате для перемешивания со скоростью 60 об./мин в течение 1 ч. Предварительно установлено, что этого времени достаточно для установления постоянных значений коэффициентов распределения элементов (D_{Ln}) в экстракционных системах.

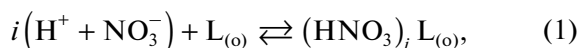
Концентрацию РЗЭ(III) в исходных и равновесных водных растворах определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) с использованием масс-спектрометра X-7 (Thermo Elemental, США). Содержание элементов в органической фазе определяли после реэкстракции 0.1 М раствором оксиэтилендиэфосфоновой кислоты. Коэффициенты распределения элементов рассчитывали как отношение их концентраций в равновесных органической и водной фазах. Погрешность определения коэффициентов распределения не превышала 5%.

Концентрацию ионов Tf_2N^- в равновесных водных фазах определяли атомно-эмиссионным методом с ионизацией пробы в индуктивно-связанной плазме с использованием спектрометра ICAP-61 (Thermo Jarrel Ash, США).

Концентрацию HNO_3 в равновесной водной фазе определяли потенциометрическим титрованием раствором NaOH , в органической – таким же образом после реэкстракции HNO_3 водой. Параллельно определяли содержание HNO_3 в органической фазе при экстракции кислоты чистым дихлорэтаном (холостой опыт). Результаты холостого опыта учитывали при расчете общей концентрации комплексов HNO_3 с экстрагентом в органической фазе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс экстракции ионов металлов из азотнокислых растворов нейтральными фосфорорганическими соединениями сопровождается взаимодействием HNO_3 с экстрагентом. Поэтому предварительно была исследована экстракция HNO_3 раствором соединения I. Данные по распределению HNO_3 между ее водными растворами и раствором соединения I в дихлорэтано (рис. 1) указывают на то, что при $[\text{HNO}_3] > 2.5$ моль/л отношение концентрации HNO_3 , связанной в комплексы с экстрагентом, к исходной концентрации экстрагента в органической фазе превышает 1. Полагая, что в органическую фазу переходят комплексы экстрагента (L) с одной и двумя молекулами азотной кислоты, процесс экстракции HNO_3 может быть описан уравнением:



где символами (o) обозначены компоненты органической фазы, $i = 1$ и 2 — число молекул HNO_3 в экстрагируемом сольвате. Эффективные константы экстракции HNO_3 (K_1 и K_2) выражаются как

$$K_i = [(\text{HNO}_3)_i \text{L}] / ([\text{L}] a^i), \quad (2)$$

где a — активность HNO_3 в равновесной водной фазе ($a = [\text{H}^+][\text{NO}_3^-] \gamma_{\pm}^2$), $[\text{L}]$ — равновесная концентрация свободного экстрагента в органической фазе). Значения K_1 и K_2 , рассчитанные нелинейным методом наименьших квадратов с использованием уравнения:

$$y/[L]_{\text{исх}} = (K_1 a + 2K_2 a^2) / (1 + K_1 a + K_2 a^2), \quad (3)$$

где y — общая концентрация комплексов HNO_3 с экстрагентом в органической фазе, $[L]_{\text{исх}}$ — исходная концентрация экстрагента, приведены в табл. 1. Там же для сравнения приведены значения K_1 и K_2 для соединений II и III. Увеличение экстракционной способности по отношению к HNO_3 в ряду соединений $\text{I} < \text{II} < \text{III}$ связано с увеличением донорной способности группы $\text{P}=\text{O}$ по мере снижения электроотрицательности заместителей при атоме фосфора [38].

Рассмотрено влияние концентрации HNO_3 в равновесной водной фазе на изменение коэффициентов распределения РЗЭ(III) при экстракции раствором соединения I в дихлорэтано (рис. 2). Экстракция $\text{Ho(III)}-\text{Lu(III)}$ возрастает с ростом $[\text{HNO}_3]$, а при экстракции $\text{La(III)}-\text{Tb(III)}$ получены зависимости $\lg D_{\text{Ln}}-[\text{HNO}_3]$ с максимумом, что связано с высаливающим действием ионов NO_3^- и связыванием экстрагента азотной кислотой, а также с изменением коэффициентов активности нитратов РЗЭ(III) в зависимости от $[\text{HNO}_3]$. Положение максимума смещается в область бо-

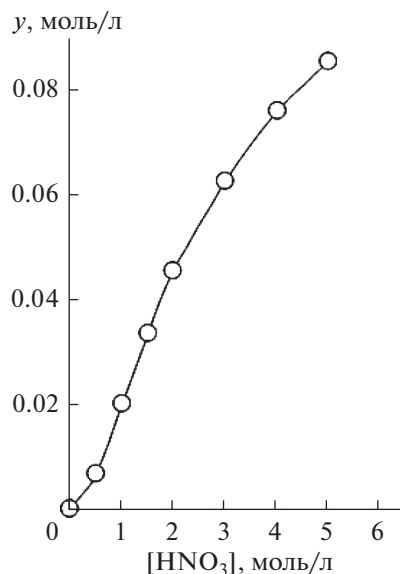


Рис. 1. Экстракция азотной кислоты 0.05 М раствором соединения I в дихлорэтано.

лее высокой кислотности водной фазы по мере увеличения атомного номера (Z) РЗЭ, что связано с увеличением энергии гидратации ионов Ln^{3+} вследствие уменьшения их ионных радиусов с возрастанием Z . Это приводит к увеличению коэффициента разделения Lu/La ($\beta_{\text{Lu/La}} = D_{\text{Lu}}/D_{\text{La}}$) с ростом концентрации HNO_3 (рис. 2). Аналогичный характер зависимостей $D_{\text{Ln}}-[\text{HNO}_3]$ отмечался при экстракции РЗЭ(III) растворами соединений II и III в виде координационно-сольватированных нитратов [23].

Стехиометрическое соотношение металл : экстрагент в экстрагируемых комплексах определено методом сдвига равновесия. Полученные данные (рис. 3) показали, что РЗЭ(III) экстрагируются этим соединением в виде смеси моно- и дисольватов. В виде комплексов такой же стехиометрии РЗЭ(III) экстрагируются растворами соединений II и III в дихлорэтано [21]. Полученные данные указывают на то, что природа заместителя при атоме фосфора в соединениях I–III не приводит к существенному изменению стехиометрии экстрагируемых комплексов РЗЭ(III). Исходя из полученных данных, процесс экстракции ионов РЗЭ(III) из

Таблица 1. Эффективные константы экстракции HNO_3 растворами соединений I–III в дихлорэтано

Соединение	K_1	K_2
I	1.15 ± 0.06	0.09 ± 0.005
II	2.70 [21]	0.23 [21]
III	8.03 [21]	1.03 [21]

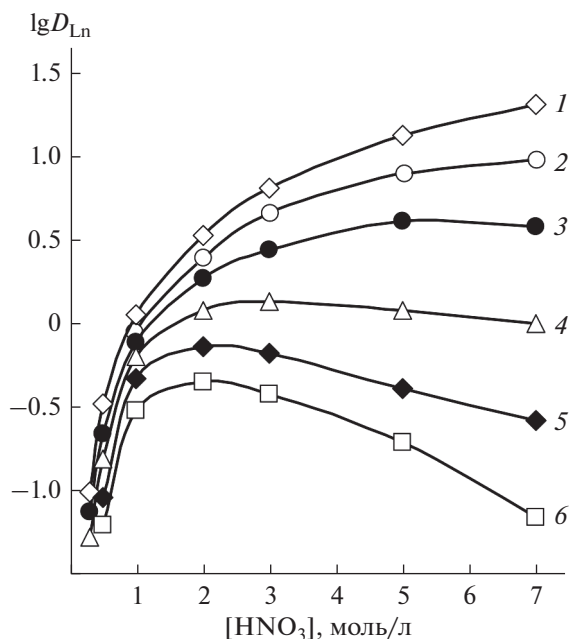


Рис. 2. Зависимости коэффициентов распределения Lu(III) (1), Ho(III) (2), Tb(III) (3), Eu(III) (4), Nd(III) (5) и La(III) (6) от концентрации HNO_3 в равновесной водной фазе при экстракции 0.1 М растворами соединения I в дихлорэтано.

растворов HNO_3 умеренной концентрации соединением I может быть описан уравнениями:

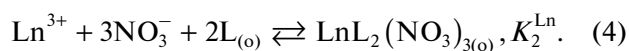
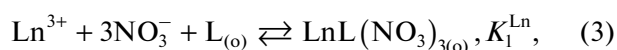


Таблица 2. Эффективные константы экстракции РЗЭ(III) из растворов HNO_3 растворами соединений I–III в дихлорэтано

Ln(III)	K_1^{Ln} (I)	K_2^{Ln} (I)	K_2^{Ln} (II) [22]	K_2^{Ln} (III) [22]
La	2.02	4.40	6.96	5.01
Ce	2.12	4.52	7.16	5.10
Pr	2.18	4.62	7.40	5.25
Nd	2.21	4.67	7.68	5.49
Sm	2.46	4.83	7.86	5.66
Eu	2.53	4.92	8.01	5.76
Gd	2.51	4.94	7.98	5.56
Tb	2.89	5.07	8.38	5.80
Dy	2.93	5.06	8.49	5.84
Ho	2.92	5.01	8.58	5.84
Er	2.87	4.94	8.66	5.91
Tm	2.86	4.92	8.64	5.86
Yb	2.87	4.91	8.62	5.81
Lu	2.88	4.90	8.62	5.68

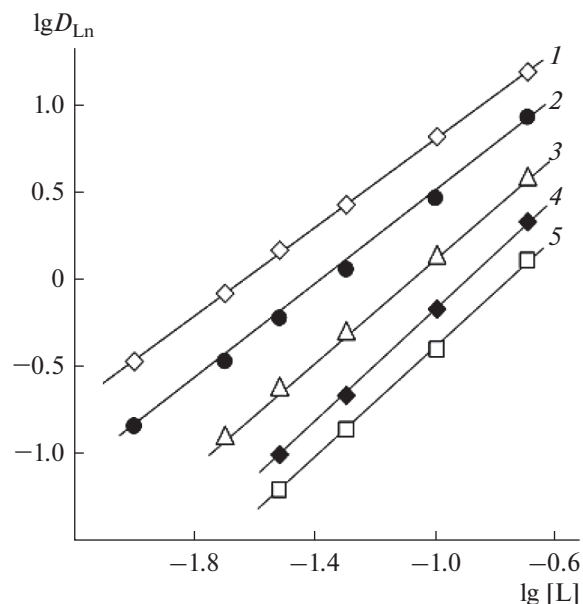


Рис. 3. Зависимости коэффициентов распределения Lu(III) (1), Tb(III) (2), Eu(III) (3), Nd(III) (4) и La(III) (5) от концентрации соединения I в дихлорэтано при экстракции из 3 М растворов HNO_3 .

Эффективные константы экстракции РЗЭ(III) (K_1^{Ln} и K_2^{Ln}), рассчитанные нелинейным методом наименьших квадратов с использованием уравнения

$$D_{\text{Ln}} = [\text{NO}_3^-]^3 \gamma_{\pm}^4 (K_1^{\text{Ln}} [L]_{\text{исх}} f^{-1} + K_2^{\text{Ln}} [L]_{\text{исх}}^2 f^{-2}), \quad (5)$$

где $\gamma_{\pm}$ – коэффициент активности соответствующего нитрата РЗЭ(III) [39], f – поправка на связывание экстрагента азотной кислотой ($f = 1 + K_1 a + K_2 a^2$), приведены в табл. 2. Там же для сравнения приведены значения K_2^{Ln} для соединений II и III. Из представленных данных видно, что экстракционная способность ФП по отношению к РЗЭ(III) возрастает в ряду соединений $\text{I} < \text{III} < \text{II}$. Высокая экстракционная способность соединения II с фенильными заместителями при атомах фосфора по отношению к РЗЭ(III) связана с проявлением ЭААУ в системах с ФП.

При экстракции РЗЭ(III) соединениями I–III из растворов с умеренной концентрацией HNO_3 наблюдается тенденция уменьшения эффективности экстракции РЗЭ(III) с увеличением Z . Это связано с увеличением устойчивости комплексов РЗЭ(III) с “жесткими” (по Пирсону) лигандами по мере увеличения плотности заряда ионов Ln^{3+} вследствие уменьшения их ионных радиусов с возрастанием Z [40].

Эффективность экстракции РЗЭ(III) раствором соединения I из азотнокислых растворов значительно возрастает в присутствии ИЖ. Это мо-

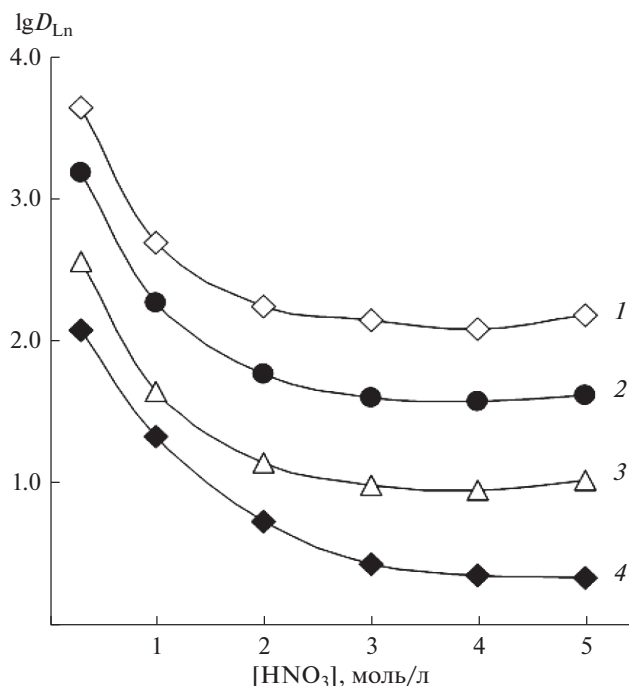
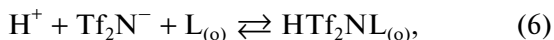


Рис. 4. Зависимости коэффициентов распределения Lu(III) (1), Tm(III) (2), Ho(III) (3) и La(III) (4) от концентрации HNO_3 в равновесной водной фазе при экстракции 0.1 М растворами соединения I в ИЖ.

жет быть связано с увеличением гидрофобности экстрагируемых комплексов вследствие замещения ионов NO_3^- более гидрофобными Tf_2N^- [41]. В присутствии ИЖ в органической фазе изменяется характер зависимости $\lg D_{\text{Ln}} - [\text{HNO}_3]$ (рис. 4). Снижение D_{Ln} с ростом $[\text{HNO}_3]$ до 3 моль/л связано с уменьшением концентрации свободного экстрагента в органической фазе вследствие взаимодействия соединения I как с HNO_3 , так и с HTf_2N , присутствующей в системе вследствие заметного перехода ионов C_4mim^+ и Tf_2N^- в водную фазу [42]. Экстракция HTf_2N соединением I может быть описана уравнением:



а константа экстракции выражена как

$$K_{\text{HTf}_2\text{N}} = [\text{HTf}_2\text{NL}] / ([\text{L}][\text{H}^+][\text{Tf}_2\text{N}^-]). \quad (7)$$

Концентрационная константа экстракции HTf_2N соединением I в дихлорэтано рассчитана исходя из данных по зависимости коэффициента распределения иона Tf_2N^- от концентрации соединения I в органической фазе и ионов Tf_2N^- и H^+ в водной фазе (рис. 5). Предварительно установлено, что в условиях эксперимента ионы Li^+ и Cl^- не переходят в органическую фазу. Величина $K_{\text{HTf}_2\text{N}} = 2690 \pm 80$ значительно превышает константу экс-

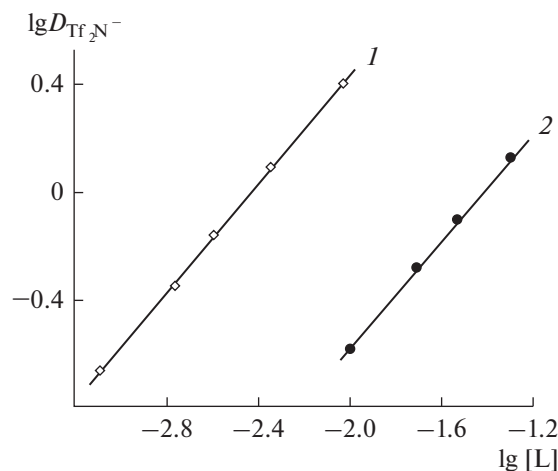


Рис. 5. Зависимости коэффициента распределения иона Tf_2N^- от концентрации соединения I в дихлорэтано при экстракции из 0.001 М растворов LiTf_2N , содержащих 0.1 (1) или 0.01 (2) моль/л HCl .

тракции HNO_3 этим соединением (табл. 1), что связано со значительно большей гидрофобностью аниона Tf_2N^- по сравнению с NO_3^- .

Величина синергетического эффекта $S = D/D_0$ (D и D_0 — коэффициенты распределения РЗЭ(III) в присутствии и в отсутствие ИЖ в органической фазе) уменьшается с увеличением $[\text{HNO}_3]$. Так, при экстракции Eu(III) величина S уменьшается от 2150 до 2.2 с ростом $[\text{HNO}_3]$ от 0.3 до 3 моль/л. Характер зависимости $D_{\text{Ln}} - Z$ при экстракции РЗЭ(III) из азотнокислых растворов растворами I в ИЖ и дихлорэтано существенно различается (рис. 6). Можно видеть, что селективность экстракции тяжелых РЗЭ(III) в системе с ИЖ выше, чем при использовании дихлорэтано в качестве растворителя: величины $\beta_{\text{Lu/Sm}}$ в этих системах равны 70.5 и 6.0.

Стехиометрическое соотношение РЗЭ(III) : I в комплексах, экстрагируемых в присутствии ИЖ, изменяется от 1 : 3 до 1 : 2 по мере увеличения концентрации HNO_3 в водной фазе (рис. 7), т.е. в системе с ИЖ наблюдается увеличение сольватных чисел в экстрагируемых комплексах по сравнению с экстракцией растворами соединения I в дихлорэтано (рис. 3). Это связано со слабой координирующей способностью ионов Tf_2N^- [43], которые находятся, по-видимому, во внешней координационной сфере экстрагируемого комплекса, тогда как в отсутствие ИЖ ионы РЗЭ(III) экстрагируются соединениями I—III в виде координационно-сольватированных нитратов $\text{LnL}_s(\text{NO}_3)_3$ ($s = 1, 2$), в которых ионы NO_3^- участвуют в координации ионов Ln^{3+} [36].

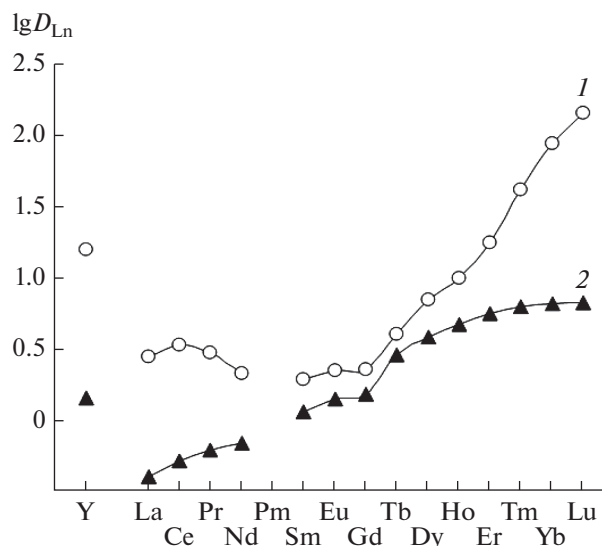


Рис. 6. Коэффициенты распределения РЗЭ(III) при их экстракции из 3 М растворов HNO_3 0.1 М растворами соединения I в ИЖ (1) и дихлорэтане (2).

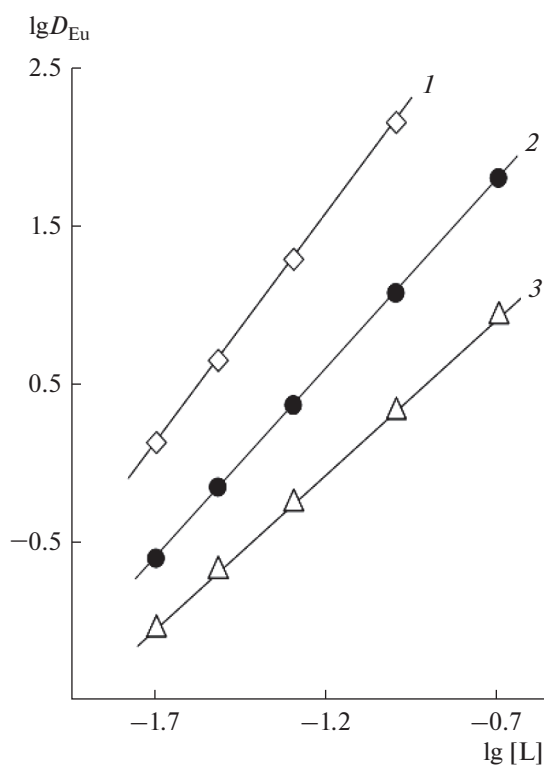


Рис. 7. Зависимости коэффициентов распределения Eu(III) от концентрации соединения I в ИЖ при экстракции из 0.1 (1), 1.0 (2) и 3.0 М растворов HNO_3 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные данные показали, что экстракционная способность ФП по отношению к РЗЭ(III) возрастает в ряду соединений $\text{I} < \text{III} < \text{II}$. Эффективность и селективность экстракции РЗЭ(III) диэтил(2-((дифенилфосфорил)метокси)-5-этилфенил)фосфонатом из азотнокислых растворов значительно увеличивается в присутствии ионной жидкости — бис[(трифторметил)сульфонил]имида 1-бутил-3-метилимидазолия в органической фазе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Государственного задания 2019 г. ИФТТ РАН, ИПТМ РАН, ИФХЭ РАН, ИФАВ РАН и при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-29-24069) и Министерства образования и науки РФ по программе повышения конкурентоспособности НИТУ «МИСиС» среди ведущих мировых научно-образовательных центров на 2013–2020 гг. (№ К1-2014-026).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайличенко А.И., Михлин Е.Б., Патрикеев Ю.Б. Редкоземельные металлы. М.: Металлургия, 1987. 323 с.
2. Alyapyshev 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. Розен А.М., Николотова З.И., Карташева Н.А. // Радиохимия. 1986. Т. 28. № 3. С. 407.
5. ЧмUTOва М.К., Литвина М.Н., Прибылова Г.А. и др. // Радиохимия. 1999. Т. 41. № 4. С. 331.
6. Sartain H.T., McGraw S.N., Lawrence C.L. // Inorg. Chim. Acta. 2015. V. 426. P. 126. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2014.11.032>
7. Горюнов Е.И., Горюнова И.Б., Баулина Т.В. и др. // Рос. хим. журн. 2010. Т. 54. № 3. С. 45.
8. Arnaud-New F., Bohmer V., Dozol J.-F. et al. // J. Chem. Soc., Perkin Trans. 1996. V. 2. P. 1175. <https://doi.org/10.1039/P29960001175>
9. Smirnov I., Karavan M., Babain V. et al. // Radiochimica Acta. 2007. V. 95. P. 97. [doi:10.1524/ract.2007.95.2.97](https://doi.org/10.1524/ract.2007.95.2.97)
10. Yafian M.R., Burgard M., Wieser C. et al. // Solvent Extr. Ion Exch. 1998. V. 16. P. 1131. <https://doi.org/10.1080/07360299808934572>
11. Смирнов И.В., Караван М.Д., Ефремова Т.И. и др. // Радиохимия. 2007. Т. 49. № 5. С. 423. [Smirnov I.V., Karavan M.D., Efremova T.I. et al. // Radiochemistry. 2007. V. 49. № 5. P. 482. <https://doi.org/10.1134/S106636220705007>]
12. Kamenik J., Sebesta F., John J. et al. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2015. V. 304. P. 313. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3543-x>

13. *Bond E.M., Engelhardt U., Deere T.P. et al.* // Solvent Extr. Ion Exch. 1997. V. 15. P. 381.
<https://doi.org/10.1080/07366299708934484>
14. *Ouizem S., Rosrio-Amorin D., Dickie D.A. et al.* // Dalton Trans. 2014. V. 43. P. 8368.
<https://doi.org/10.1039/C3DT53611D>
15. *Narita H., Yaita T., Tamura K., Tachimori S.* // Radiochim. Acta. 1998. V. 81. P. 223.
<https://doi.org/10.1524/ract.1998.81.4.223>
16. *Sasaki Y., Sugo Y., Suzuki S., Tachimori S.* // Solvent Extr. Ion Exch. 2001. V. 19. P. 91.
<https://doi.org/10.1081/SEI-100001376>
17. *Zhui Z.-X., Sasaki Y., Suzuki S., Kimura T.* // Analyt. Chim. Acta. 2004. V. 527. P. 163.
<https://doi.org/10.1016/j.aca.2004.09.023>
18. *Sasaki Y., Sugo Y., Morita K., Nash K.L.* // Solvent Extr. Ion Exch. 2015. V. 33. P. 625.
<https://doi.org/10.1080/07366299.2015.1087209>
19. *Campbell E., Holfeltz V.E., Hall G.B. et al.* // Solvent Extr. Ion Exch. 2018. V. 36. P. 331.
<https://doi.org/10.2172/1488863>
20. *Ansari S.A., Mohapatra P.K., Leoncini A. et al.* // Dalton Trans. 2017. V. 46. P. 11355.
<https://doi.org/10.1039/C7DT03831C>
21. *Туранов А.Н., Карандашев В.К., Евсеева Н.К. и др.* // Радиохимия. 1999. Т. 41. № 3. С. 219.
22. *Turanov A.N., Karandashev V.K., Baulin V.E.* // Solv. Extr. Ion Exch. 1999. V. 17. P. 1423.
<https://doi.org/10.1080/07366299908934656>
23. *Turanov A.N., Karandashev V.K., Baulin V.E. et al.* // Solv. Extr. Ion Exch. 2009. V. 27. P. 551.
<https://doi.org/10.1080/07366290903044683>
24. *Розен А.М., Николотова З.И., Карташева Н.А., Юдина К.С.* // ДАН СССР. 1975. Т. 222. № 5. С. 1151.
25. *Сафиуллина А.М., Синегрибова О.А., Баулин В.Е. и др.* // Цветные металлы. 2012. № 3. С. 43.
26. *Koel M.* // Crit. Rev. Anal. Chem. 2005. V. 35. P. 177.
<https://doi.org/10.1080/10408340500304016>
27. *Kolarik Z.* // Solvent Extr. Ion Exch. 2013. V. 31. P. 24.
<https://doi.org/10.1080/07366299.2012.700589>
28. *Billard I.* // Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths. 2013. V. 43. Chapter 256. P. 213.
29. *Mohapatra P.K.* // Chem. Prod. Proc. Model. 2015. V. 10. P. 135.
30. *Nakashima K., Kubota F., Maruyama T., Goto M.* // Anal. Sci. 2003. V. 19. P. 1097.
<https://doi.org/10.2116/analsci.19.1097>
31. *Туранов А.Н., Карандашев В.К., Баулин В.Е.* // Журн. неорган. химии. 2008. Т. 53. № 6. С. 1045. [*Turanov A.N., Karandashev V.K., Baulin V.E.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2008. T. 53. № 6. C. 970.
<https://doi.org/10.1134/S0036023608060272>]
32. *Туранов А.Н., Карандашев В.К., Баулин В.Е.* // Радиохимия. 2008. Т. 50. № 3. С. 229. [*Turanov A.N., Karandashev V.K., Baulin V.E.* // Radiochemistry. 2008. T. 50. № 3. C. 266.
<https://doi.org/10.1134/S1066362208030090>]
33. *Shimojo K., Kurahashi K., Naganava H.* // Dalton Trans. 2008. V. 37. P. 5083.
<https://doi.org/10.1039/B810277P>
34. *Turanov A.N., Karandashev V.K., Baulin V.E.* // Solv. Extr. Ion Exch. 2008. V. 26. P. 77.
<https://doi.org/10.1080/07366290801904871>
35. *Panja S., Mohapatra P.K., Tripathi S.C. et al.* // Sep. Purif. Technol. 2012. V. 96. P. 289.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.06.015>
36. *Демин С.В., Жилов В.И., Нефедов С.Е. и др.* // Журн. неорган. химии. 2012. Т. 57. № 6. С. 970. [*Demin S.V., Nefedov S.E., Zhilov V.I. et al.* // Russ. J. Inorg. Chem. 2012. V. 57. № 6. P. 897.
<https://doi.org/10.1134/S0036023612060095>]
37. *Bonhote P., Dias A.P., Papageorgiou N. et al.* // Inorg. Chem. 1996. V. 35. P. 1168.
<https://doi.org/10.1021/ic951325x>
38. *Rozen A.M., Krupnov B.V.* // Russ. Chem. Rev. 1996. V. 65. № 11. P. 973.
<https://doi.org/10.1070/RC1996v065n11ABEH000241>
39. *Власов В.С., Розен А.М.* // Радиохимия. 1988. Т. 30. № 1. С. 146.
40. *Яцимирский К.Б., Костромина Н.А., Шека З.А. и др.* Химия комплексных соединений редкоземельных металлов. Киев: Наук. думка, 1966. 494 с.
41. *Turanov A.N., Karandashev V.K., Yarkevich A.N.* // Radiochemistry. 2018. V. 60. № 2. P. 170.
<https://doi.org/10.1134/S1066362218020078>
42. *Gaillard C., Boltoeva M., Billard I. et al.* // Chem. Phys. Chem. 2015. V. 16. P. 2653.
<https://doi.org/10.1002/cphc.201500283>
43. *Binnemans K.* // Chem. Rev. 2007. V. 107. P. 2593.
<https://doi.org/10.1021/cr050979c>