

ЭКСТРАКЦИЯ РЗЭ(III) ИЗ АЗОТНОКИСЛЫХ СРЕД РАСТВОРАМИ ТЕТРАОКТИЛДИГЛИКОЛЬАМИДА В БИС[(ТРИФТОРМЕТИЛ)СУЛЬФОНИЛ]ИМИДЕ ТРИОКТИЛАММОНИЯ

© 2023 г. А. Н. Туранов¹, В. К. Карандашев², В. А. Хвостиков², В. Е. Баулин³, Д. В. Баулин^{4,*}

¹ Институт физики твердого тела имени Ю. А. Осипяна Российской академии наук, Черноголовка, 142432 Россия

² Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук, Черноголовка, 142432 Россия

³ Институт физиологически активных веществ Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии, Черноголовка, 142432 Россия

⁴ Институт физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина Российской академии наук, Ленинский пр. 31/4, Москва, 119991 Россия

*e-mail: badmitriy@gmail.com

Поступило в редакцию 30 мая 2023 г.

После доработки 6 июля 2023 г.

Принято к печати 10 июля 2023 г.

Исследовано влияние ионной жидкости бис[(трифторметил)сульфонил]имида триоктиламмония на экстракцию РЗЭ(III) тетраоктилдигликольамидом из азотнокислых сред. Установлено, что в присутствии ионной жидкости в органической фазе эффективность и селективность экстракции ионов металлов из азотнокислых растворов значительно возрастает. Рассмотрено влияние кислотности водной фазы на изменение коэффициентов распределения РЗЭ(III) и определена стехиометрия экстрагируемых комплексов.

Ключевые слова: экстракция, РЗЭ(III), тетраоктилдигликольамид, ионные жидкости

DOI: 10.31857/S0044460X23080127, **EDN:** IYPQMW

Индивидуальные редкоземельные элементы (РЗЭ) и их соединения широко используются во многих отраслях науки и высокотехнологичных отраслях техники, например, при производстве современных магнитных материалов, люминофоров, рабочих элементов лазерной техники, радиофармацевтических препаратов [1]. Растущее потребление РЗЭ и их соединений вызывает необходимость переработки минерального сырья с низким содержанием РЗЭ, а также промышленных отходов [2, 3]. Для извлечения, концентрирования и разделения ионов РЗЭ(III) широко используются экстракционные методы. Высокой экстракционной способностью по отношению к ионам РЗЭ(III) обладают нейтральные моно- и полидентатные

фосфорорганические соединения [4–6], а также диамины дигликолевой кислоты. Влияние строения диаминов дигликолевой кислоты на их экстракционную способность и селективность достаточно подробно изучено [7–12]. Установлено, что увеличение длины алкильных заместителей при атомах азота приводит к существенному повышению растворимости экстрагента в органических растворителях [7]. В связи с этим тетраоктилдигликольамид нашел широкое использование в экстракционной практике [10]. Несомненным достоинством этого соединения является его хорошая совместимость с алифатическими органическими растворителями, высокая гидролитическая и радиолитическая устойчивость, а также простота син-

Схема 1.

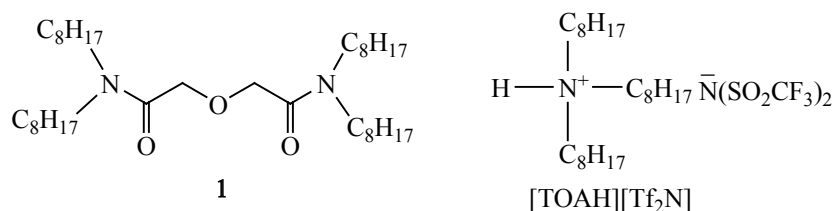
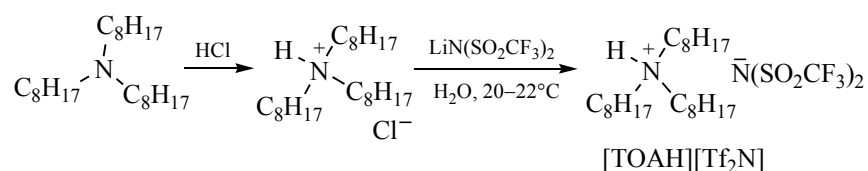


Схема 2.



теза [10]. Установлено, что при комплексообразовании с ионами РЗЭ(III) тетраоктилдигликольамид действует как тридентатный лиганд [11].

Существенное влияние на экстракцию актинидов и РЗЭ(III) растворами диамидов дигликолевой кислоты оказывает природа органического разбавителя [10]. В последнее время возрос интерес к использованию ионных жидкостей в качестве разбавителей нейтральных донорно-активных экстрагентов при экстракции ионов металлов [13–26]. Помимо того, что ионные жидкости негорючи, нелетучи и обладают высокой диэлектрической проницаемостью, замена ими традиционных молекулярных растворителей в экстракционных системах часто приводит к повышению степени извлечения ионов металлов [13–17]. Установлено, что добавка даже небольших количеств ионных жидкостей в органическую фазу значительно повышает эффективность экстракции ионов металлов [27–29]. В большинстве опубликованных работ по экстракции ионов металлов использовали ионные жидкости на основе катионов 1-алкил-3-метилимидазолия ($[\text{C}_n\text{mim}]^+$). Использование бис[(трифторметил)сульфонил]имида (Tf_2N^-) в качестве анионного компонента ионных жидкостей определяется его высокой гидрофобностью, гидролитической и радиолитической устойчивостью в азотнокислых средах по сравнению с анионом гек-

сафторфосфата [13]. Существенным недостатком ионных жидкостей является значительный переход их в водную фазу при осуществлении процесса экстракции. Это приводит к потерям ионных жидкостей и загрязнению рафинатов экстракционных систем. Одним из путей преодоления этого недостатка является использование ионных жидкостей на основе катионов алкиламмония. Такие ионные жидкости обладают значительно большей гидрофобностью, меньшей токсичностью и простотой синтеза по сравнению с ионными жидкостями на основе катионов 1-алкил-3-метилимидазолия [30].

Цель данной работы – исследование влияния ионной жидкости бис[(трифторметил)сульфонил]имида триоктиламмония $[\text{TOAH}][\text{Tf}_2\text{N}]$ на экстракцию РЗЭ(III) тетраоктилдигликольамидом **1** (схема 1) из азотнокислых растворов.

Синтез бис(трифторсульфонил)имида триоктиламмония $[\text{TOAH}][\text{Tf}_2\text{N}]$ осуществлен по методу, описанному в работе [31], модифицированному согласно схеме 2.

Для оценки гидрофобности исследованной ионной жидкости $[\text{TOAH}][\text{Tf}_2\text{N}]$ определена концентрация ионов Tf_2N^- в водной фазе после контакта с растворами азотной кислоты. Для сравнения приведены данные для имидазолиевой ионных жидкостей $[\text{C}_4\text{mim}][\text{Tf}_2\text{N}]$. Как видно из данных,

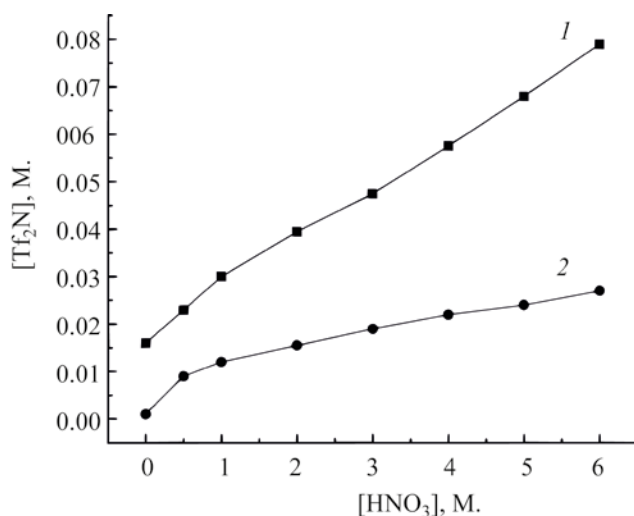


Рис. 1. Влияние концентрации HNO_3 в водной фазе на концентрацию ионов Tf_2N^- в водной фазе при контакте ионных жидкостей $[\text{C}_4\text{mim}][\text{Tf}_2\text{N}]$ (1) и $[\text{TOAH}][\text{Tf}_2\text{N}]$ (2) с водными растворами HNO_3 .

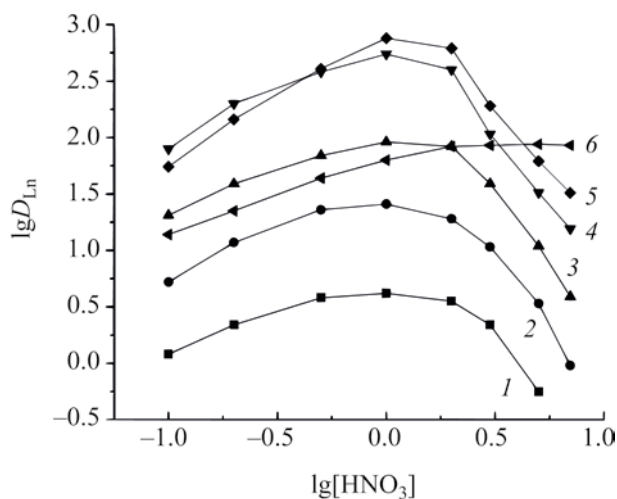
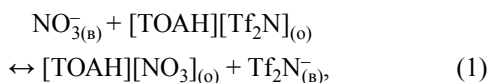


Рис. 2. Зависимость коэффициентов распределения La(III) (1), Ce(III) (2), Nd(III) (3), Eu(III) (4), Tb(III) (5) и Lu(III) (6) от концентрации HNO_3 в водной фазе при экстракции 0.01 M/ растворами тетраоктилдигликольамида в $[\text{TOAH}][\text{Tf}_2\text{N}]$.

представленных на рис. 1, увеличение равновесной концентрации HNO_3 в водной фазе приводит к увеличению концентрации ионов Tf_2N^- в водной фазе. Это связано с образованием нитрата триоктиламмония в органической фазе в результате протекания обменной реакции (1).



где символами (в) и (о) обозначены компоненты водной и органической фаз соответственно.

Полученные данные указывают на более высокую гидрофобность $[\text{TOAH}][\text{Tf}_2\text{N}]$ по сравнению с $[\text{C}_4\text{mim}][\text{Tf}_2\text{N}]$, что определяет значительно меньшие потери алкиламмониевой ионных жидкостей в процессе экстракции.

Рассмотрено влияние концентрации HNO_3 в водной фазе на изменение коэффициентов распределения РЗЭ(III) (D_{Ln}) при экстракции раствором тетраоктилдигликольамида в $[\text{TOAH}][\text{Tf}_2\text{N}]$. Увеличение $[\text{HNO}_3]$ от 0.1 до 1 моль/л сопровождается ростом D_{Ln} , а дальнейшее увеличение $[\text{HNO}_3]$ приводит к уменьшению D_{Ln} (рис. 2). Это связано с высаливающим действием ионов NO_3^- и со снижением концентрации свободного экстрагента в

равновесной органической фазе вследствие взаимодействия его как с HNO_3 , так и HTf_2N , присутствующего в экстракционной системе вследствие заметного перехода ионов Tf_2N^- в водную фазу.

Проведено сопоставление эффективности и селективности экстракции РЗЭ(III) из азотнокислых сред растворами тетраоктилдигликольамида в $[\text{TOAH}][\text{Tf}_2\text{N}]$, $[\text{C}_4\text{mim}][\text{Tf}_2\text{N}]$ и дихлорэтано. При экстракции РЗЭ(III) растворами тетраоктилдигликольамида в дихлорэтано наблюдается увеличение величины D_{Ln} с увеличением атомного номера РЗЭ(III) (Z) [29]. Это связано с увеличением устойчивости комплексов РЗЭ(III) с жестким (по Пирсону) лигандом тетраоктилдигликольамидом по мере увеличения плотности заряда ионов Ln^{3+} вследствие уменьшения их ионных радиусов с возрастанием Z [32]. В системе тетраоктилдигликольамид– $[\text{TOAH}][\text{Tf}_2\text{N}]$ величины D_{Ln} возрастают в ряду РЗЭ(III) от La(III) до Dy(III) , а затем снижаются (рис. 3). Это приводит к уменьшению коэффициента разделения Lu(III) и La(III) ($\beta_{\text{Lu/La}} = D_{\text{Lu}}/D_{\text{La}}$) от 275 до 39 при использовании дихлорэтано и $[\text{TOAH}][\text{Tf}_2\text{N}]$ в качестве растворителя. Еще большее снижение селективности экстракции РЗЭ(III) наблюдается в системе тетраоктилдигликольамид/ $[\text{C}_4\text{mim}][\text{Tf}_2\text{N}]$, где $\beta_{\text{Lu/La}} = 0.76$. Аналогичное сни-

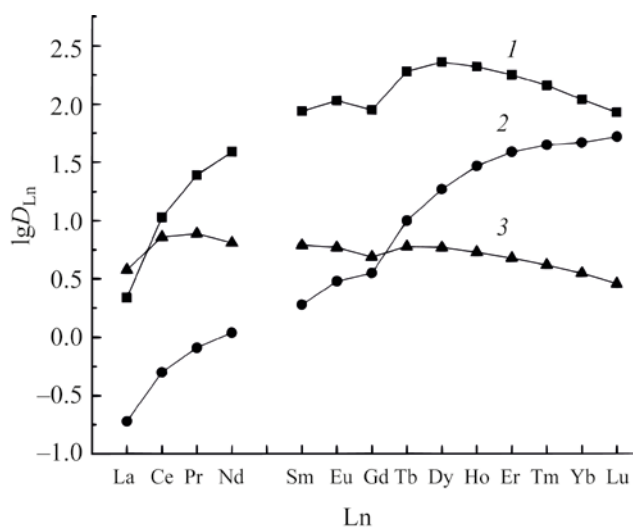


Рис. 3. Коэффициенты распределения РЗЭ(III) при экстракции растворами 0.01 моль/л тетраоктилдигликольамида в [TOAH][Tf₂N] (1), [C₄mim][Tf₂N] (3) и дихлорэтано (2) из растворов 1 моль/л HNO₃.

жение селективности экстракции РЗЭ(III) из азотнокислых растворов в присутствии ионных жидкостей отмечалось при экстракции растворами тетрабутилдигликольамида в [C₄mim][Tf₂N] [21]. При экстракции из раствора 3 моль/л HNO₃ наиболее высокие значения D_{Ln} наблюдаются в системе тетраоктилдигликольамид–[TOAH][Tf₂N] (рис. 3). Это указывает на то, что использование алкиламмониевой ионных жидкостей [TOAH][Tf₂N] вместо имидазольевой ионных жидкостей [C₄mim][Tf₂N] приводит не только к снижению перехода компонентов ионных жидкостей в водную фазу, но и к значительному увеличению эффективности и селективности экстракции РЗЭ(III) из азотнокислых растворов.

Стехиометрическое соотношение РЗЭ(III)–тетраоктилдигликольамид в экстрагируемых комплексах определено методом сдвига равновесия. Для этого рассмотрены зависимости коэффициентов распределения РЗЭ(III) от концентрации тетраоктилдигликольамида в [TOAH][Tf₂N] при постоянной концентрации HNO₃ в водной фазе. Угловой наклон зависимостей $\lg D_{Ln} - \lg [L]$ близок к 3 (рис. 4), что указывает на экстракцию ионов РЗЭ(III) из азотнокислых растворов в виде три-сольватов. Ранее было показано, что ионы РЗЭ(III)

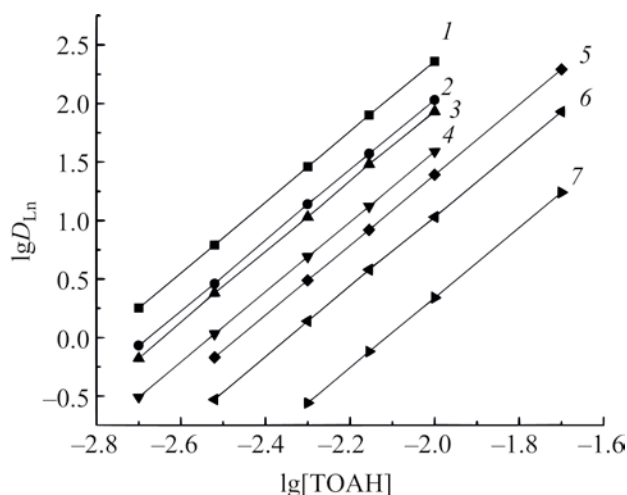


Рис. 4. Зависимость коэффициентов распределения Dy(III) (1), Eu(III) (2), Lu(III) (3), Nd(III) (4), Pr(III) (5), Ce(III) (6) и La(III) (7) от концентрации тетраоктилдигликольамида в [TOAH][Tf₂N] при экстракции из раствора 3 моль/л HNO₃.

экстрагируются растворами тетраоктилдигликольамида в дихлорэтано из азотнокислых растворов в виде комплексов с соотношением РЗЭ(III):-тетраоктилдигликольамид = 1:2 и 1:3 [29], т. е. в системе с ионной жидкостью наблюдается увеличение сольватных чисел в экстрагируемых комплексах по сравнению с экстракцией растворами тетраоктилдигликольамида в дихлорэтано. Это связано со слабой координирующей способностью ионов Tf₂N⁻ [33], которые находятся, по-видимому, во внешней координационной сфере экстрагируемого комплекса, тогда как в отсутствие ионных жидкостей ионы РЗЭ(III) экстрагируются растворами тетраоктилдигликольамида в виде координационно-сольватированных нитратов, в которых ионы NO₃⁻ участвуют в координации ионов Ln³⁺ [10].

Исследовано также влияние добавки [TOAH][Tf₂N] к растворам тетраоктилдигликольамида в органических растворителях на эффективность и селективность экстракции РЗЭ(III) из азотнокислых растворов. Предварительно установлено, что растворы [TOAH][Tf₂N] в этих растворителях практически не экстрагируют РЗЭ(III) из азотнокислых растворов (величины D_{Ln} не превышают 10⁻²). При экстракции РЗЭ(III) смесями тетраок-

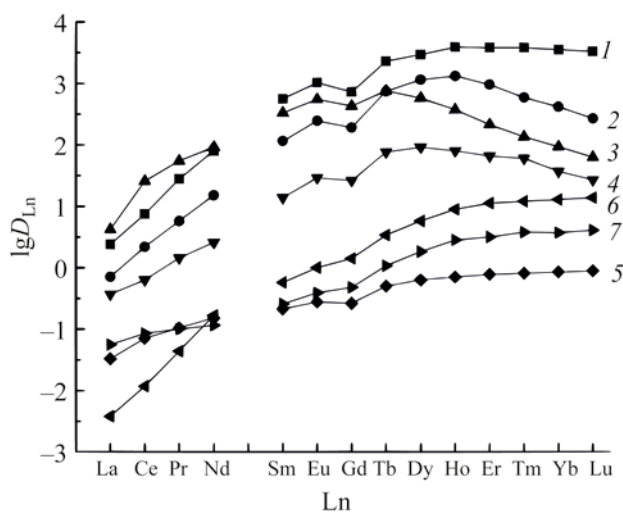


Рис. 5. Коэффициенты распределения РЗЭ(III) при экстракции растворами 0.01 моль/л тетраоктилдигликольамида в смеси додекан–октанол, содержащей 0.03 моль/л [TOAH][Tf₂N] (1), дихлорэтано, содержащем 0.03 моль/л [TOAH][Tf₂N] (2), неразбавленной [TOAH][Tf₂N] (3), октанол, содержащем 0.03 моль/л [TOAH][Tf₂N] (4), дихлорэтано (5), смеси додекан–октанол (6) и в октанол (7) из растворов 1 моль/л HNO₃.

тилдигликольамида и [TOAH][Tf₂N] в таких растворителях происходит значительное увеличение извлечения ионов РЗЭ(III) в органическую фазу (рис. 5). Наблюдаемый синергетический эффект может быть связан с вхождением гидрофобных анионов Tf₂N⁻ в состав экстрагируемых комплексов, приводящим к увеличению их гидрофобности по сравнению с сольватированными нитратами РЗЭ(III), экстрагируемыми растворами тетраоктилдигликольамида из азотнокислых растворов. Природа органического разбавителя оказывает значительное влияние на эффективность и селективность экстракции РЗЭ(III) из азотнокислых растворов. В присутствии [TOAH][Tf₂N] величины D_{Ln} возрастают в ряду октанол < дихлорэтан < смесь додекана и октанола с объемным соотношением 9:1 (рис. 5). В такой же последовательности увеличиваются и селективность экстракции: величина $\beta_{Lu/La}$ возрастает в ряду октанол (72) < дихлорэтан (380) < смесь додекана и октанола с объемным соотношением 9:1 (1660). Величина синергетического эффекта обычно выражают как:

$$SC = D_{Ln}/D_{Ln(o)}, \quad (2)$$

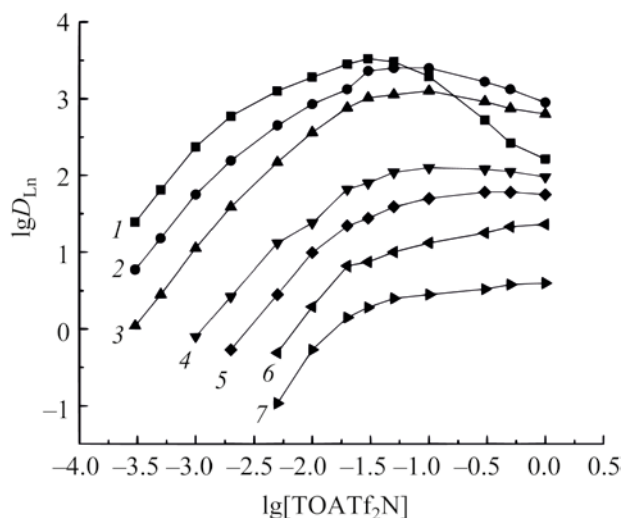


Рис. 6. Зависимость коэффициентов распределения Lu(III) (1), Tb(III) (2), Eu(III) (3), Nd(III) (4), Pr(III) (5), Ce(III) (6) и La(III) (7) от концентрации [TOAH][Tf₂N] в смеси додекан–октанол (9:1), содержащей 0.01 моль/л тетраоктилдигликольамида, при экстракции из раствора 1 моль/л HNO₃.

где D_{Ln} и $D_{Ln(o)}$ – коэффициенты распределения РЗЭ(III) в присутствии и в отсутствие ионных жидкостей в органической фазе.

При использовании в качестве разбавителя смеси нонан–октанол величина SC возрастает в ряду РЗЭ(III) от 150 (La) до 1000 (Eu), а затем снижается до 230 (Lu). Из данных рис. 5 видно, что при использовании смеси додекан–октанол в качестве разбавителя величины D_{Ln} и SC значительно выше, чем в системе с неразбавленной ионных жидкостей.

Рассмотрено влияние концентрации [TOAH][Tf₂N] в органической фазе на изменение D_{Ln} при экстракции РЗЭ(III) из азотнокислых растворов. При постоянной концентрации тетраоктилдигликольамида в органической фазе увеличение концентрации [TOAH][Tf₂N] до 0.03 моль/л приводит к росту D_{Ln} . При этом угловой наклон линейного участка зависимости $\lg D_{Ln} - \lg[TOAH][Tf_2N]$ близок 2 (рис. 6), что указывает на участие двух ионов Tf₂N⁻ в образовании экстрагируемых комплексов. Дальнейшее увеличение концентрации [TOAH][Tf₂N] мало влияет на

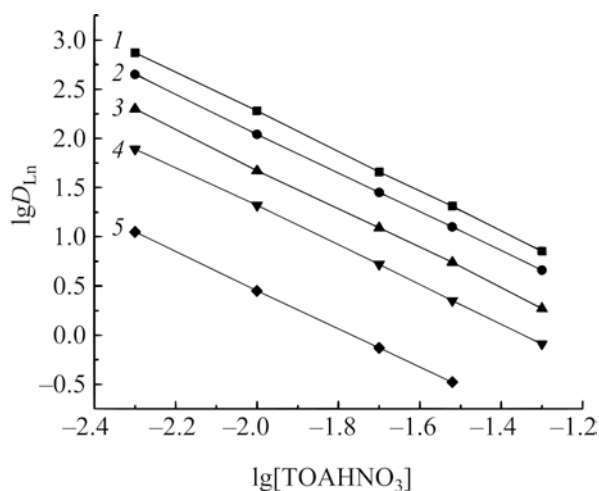
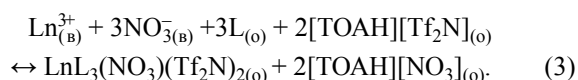


Рис. 7. Зависимость коэффициентов распределения Lu(III) (1), Tb(III) (2), Eu(III) (3), Nd(III) (4), Pr(III) (5), Ce(III) (6) и La(III) (7) от концентрации [TOAH][NO₃] в растворах додекан–октанол (9:1), содержащих 0.01 моль/л тетраоктилдигликольамида и 0.01 моль/л [TOAH][Tf₂N], при экстракции из раствора 0.5 моль/л HNO₃.

изменение D_{Ln} , а при экстракции тяжелых РЗЭ(III) наблюдается снижение D_{Ln} при концентрации ионных жидкостей выше 0.03 моль/л (рис. 6). Это приводит к снижению селективности экстракции РЗЭ(III) с увеличением концентрации [TOAH][Tf₂N] в органической фазе. При экстракции РЗЭ(III) из 1 М. раствора азотной кислоты 0.01 М. раствором тетраоктилдигликольамида увеличение концентрации ионных жидкостей от 0.01 до 1 моль/л сопровождается снижением величина $\beta_{Lu/La}$ от 3630 до 40.7, а при экстракции 0.01 М. раствором тетраоктилдигликольамида в неразбавленной [TOAH][Tf₂N] $\beta_{Lu/La} = 15$.

Процесс экстракции РЗЭ(III) растворами тетраоктилдигликольамида (L) в присутствии [TOAH][Tf₂N] в органической фазе может быть описан уравнением (3).



Из уравнения (3) следует, что увеличение концентрации [TOAH][NO₃] в органической фазе приводит к снижению перехода ионов РЗЭ(III) в органическую фазу. При постоянных концентрациях тетраоктилдигликольамида и [TOAH][Tf₂N] в ор-

ганической фазе и при постоянной концентрации HNO₃ в водной фазе угловой наклон зависимостей $\lg D_{Ln} - \lg [TOAHNO_3]$ близок к 2 (рис. 7), что соответствует протеканию процесса экстракции по уравнению (3).

Представленные данные показали, что в присутствии ионной жидкости [TOAH][Tf₂N] в органической фазе эффективность и селективность экстракции ионов РЗЭ(III) из азотнокислых растворов значительно возрастает.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Тетраоктилдигликольамид [34] и бис[(трифторметил)сульфонил]имид 1-бутил-3-метилимидазолия ([C₄mim][Tf₂N]) [35] синтезированы и очищены по известным методикам. Исходные соединения для синтеза ионной жидкости [TOAH][Tf₂N] – триоктиламин и бис(трифторсульфонил)имид лития – являются коммерческими продуктами (ООО «Реакор», Москва). В качестве органических растворителей при проведении экстракции использовали додекан, октанол, хлороформ и 1,2-дихлорэтан (Вектон) квалификации ХЧ без дополнительной очистки.

Спектры ЯМР ¹H записаны на спектрометре BrukerCXP-200 относительно ТМС в качестве внутреннего стандарта. Анализ содержания С, Н и N проводили на С, Н, N-анализаторе (Carlo Erba Strumentazione, Италия).

Бис(трифторсульфонил)имид триоктил-аммония [TOAH][Tf₂N]. К раствору 5.0 г (14.1 ммоль) триоктиламина в 15 мл 96%-ного этилового спирта добавляли по каплям при перемешивании при комнатной температуре 2.39 мл (28.2 ммоль) мл 36%-ной HCl. Смесь перемешивали 1 ч, затем упаривали в вакууме. Остаток растворяли в 15 мл воды, к полученному раствору добавляли 8.1 г (28.2 ммоль) бис(трифторсульфонил)имида лития. Полученную эмульсию перемешивали 1 ч, затем экстрагировали CHCl₃ (3×10 мл). Полученный экстракт промывали водой (3×10 мл) до отрицательной пробы на анион хлора с AgNO₃ и упаривали основное количество растворителя. Остаток растворителя удаляли в вакууме с капилляром (3 ч, 1 мм рт. ст., 80°C). Выход 7.9 г (88%), вязкое маслообразное вещество желтого цвета. Спектр ЯМР ¹H (CDCl₃), δ, м. д.:

0.84 т (9Н, NCH₂CH₂(CH₂)₅CH₃, ³J_{HH} 7.18 Гц), 1.28 м [30Н, NCH₂H₂(CH₂)₅CH₃], 1.62 м [6Н, NCH₂CH₂(CH₂)₅CH₃], 3.11 м [6Н, NCH₂CH₂(CH₂)₅CH₃], 7.42. уш. с (1Н, NH). Найдено, % : С 48.94, 48.99; Н 8.01, 7.95; N 4.65, 4.86. C₂₆H₅₂F₆N₂O₄S₂. Вычислено, % : С 49.19; Н 8.26; N 4.88.

Исходные водные растворы готовили растворением соответствующих нитратов РЗЭ(III) в воде с последующим добавлением HNO₃ до требуемой концентрации. Все ионы РЗЭ(III) (кроме Рm) присутствовали в растворе, исходная концентрация каждого из них составляла 1×10⁻⁵ моль/л. Контакт фаз осуществляли при температуре 22±2°C на аппарате для перемешивания со скоростью 60 об/мин в течение 1 ч, что достаточно для установления постоянных значений коэффициентов распределения (D_{Lн}).

Концентрацию РЗЭ(III) в исходных и равновесных водных растворах определяли методом масс-спектрометрии с ионизацией пробы в индуктивно связанной плазме с использованием масс-спектрометра XSeries II (Thermo Scientific, США). Содержание ионов металлов в органической фазе определяли как разницу между их концентрациями до и после экстракции. Значения D_{Lн} рассчитывали, как отношение их концентраций в равновесных органической и водной фазах. Погрешность определения величины коэффициентов распределения не превышала 10%. Концентрацию HNO₃ в равновесной водной фазе определяли потенциометрическим титрованием стандартным раствором NaOH. Концентрацию ионов Tl⁺ в водных растворах определяли атомно-эмиссионным методом с ионизацией пробы в индуктивно связанной плазме с использованием спектрометра ICAP-61 (Thermo Jarrel Ash, США).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Туранов Александр Николаевич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5064-191X>

Хвостиков Владимир Анатольевич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2543-6842>

Баулин Владимир Евгеньевич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5956-2601>

Баулин Дмитрий Владимирович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5414-3494>

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках государственных заданий на 2023 г. Института физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, Института физиологически активных веществ РАН и Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Balaram V. // Geosci. Front. 2019. Vol. 10. P. 1285. doi 10.1016/gsf.2018.12.005
2. Rho B.-J., Sun P.-P., Cho S.-Y. // Sep. Purif. Technol. 2020. Vol. 238. 116429. doi 10.1016/j.seppur.2019.116429
3. Liu H., Li S., Wang B., Wang K., Wu R., Ekberg C., Volinsky A.A. // J. Clean Prod. 2019. Vol. 238. 117998. doi 10.1016/j.clepro.2019.117998
4. Аляпишев М.Ю., Бабаин В.А., Устынюк Ю.А. // Усп. хим. 2016. Т. 85. № 9. С. 943; Alyapyshev M.Yu., Babain V.A., Ustynyuk Yu.A. // Russ. Chem. Rev. 2016. Vol. 85. N 9. P. 943. doi 10.1070/RCR4588
5. Liu T., Chen J. // Sep. Purif. Technol. 2021. Vol. 276. 119263. doi 10.1016/j.seppur.2021.119263
6. Wei H., Li Y., Zhang Z., Liao W. // Hydrometallurgy 2020. Vol. 191. 105242. doi 10.1016/j.hydromet.2019.105242
7. Sasaki Y., Sugo Y., Suzuki S., Tachimori S. // Solvent Extr. Ion Exch. 2001. Vol. 19. P. 91. doi 10.1081/SEI-100001376
8. Sasaki Y., Sugo Y., Morita K., Nash K.L. // Solvent Extr. Ion Exch. 2015. Vol. 33. P. 625. doi 10.1080/07366299.2015.1087209
9. Campbell E., Holfeltz V.E., Hall G.B., Nash K.L., Lumetta G.J., Levitskaia T.G. // Solvent Extr. Ion Exch. 2018. Vol. 36. P. 331. doi 10.1080/07366299.2018.1447261
10. Ansari S.A., Pathak P.N., Mohapatra P.K., Manchanda V.K. // Chem. Rev. 2012. Vol. 112, P. 1751. doi 10.1021/cr200002f
11. Chen Z., Yang X., Song L., Wang X., Xiao Q., Feng Q., Ding S. // Inorg. Chim. Acta. 2020. Vol. 513. 119928.
12. Mowafy E.A., Alshammari A., Mohamed D. // Solvent Extr. Ion Exch. 2022. Vol. 40. P. 387. doi 10.1080/07366299.2021.1925002
13. Kolarik Z. // Solvent Extr. Ion Exch. 2013. Vol. 31. P. 24. doi 10.1080/07366299.2012.700589

14. Sun X., Luo H., Dai S. // Chem. Rev. 2012. Vol. 112. P. 2100. doi 10.1021/cr200193x
15. Shkrob I.A., Marin T.W., Jensen M.P. // Ind. Eng. Chem. Res. 2014, Vol. 53. P. 3641. doi 10.1021/ie4036719
16. Riano S., Foltova S.S., Binnemans K. // RSC Adv. 2020. Vol. 10. P. 307. doi 10.1039/c9ra08996
17. Raut D.R., Sharma S., Ghosh S.K., Mohapatra P.K. // Sep. Sci. Technol. 2017. Vol. 52. P. 1430. doi 10.1080/01496395.2017.1290112
18. Khodakarami M., Alagha L. // Sep. Purif. Technol. 2020. Vol. 232. Article no. 115952. doi 10.1016/j.seppur.2019.11595
19. Iqbal M., Waheed K., Rahat S.B., Mehmood T., Lee M.S. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2020. Vol. 325. P. 1. doi 10.1007/s10967-020-07199-1
20. Shimojo K., Kurahashi K., Naganawa H. // Dalton Trans. 2008. P. 5083. doi 10.1039/B810277P
21. Mincher M.E., Quach D.L., Liao Y.J., Mincher B.J., Wai C.M. // Solvent Extr. Ion Exch. 2012. Vol. 30. P. 735. doi 10.1080/07366299.2012.700583
22. Panja S., Mohapatra P.K., Tripathi S.C., Gandhi P.M., Janardan P. // Sep. Purif. Technol. 2012. Vol. 96. P. 289. doi 10.1016/j.seppur.2012.06.015
23. Mohapatra P.K. // Chem. Prod. Proc. Model. 2015. Vol. 10. P. 135. doi 10.1515/cppm-2014-0030
24. Atanassova M. // J. Mol. Liq. 2021. Vol. 343. Article no. 117530. doi 10.1016/j.molliq.2021.117530
25. Wang K., Adidharma H., Radosz M., Wang P., Xu X., Russell C.K., Tian H., Fan M., Yu J. // Green Chem. 2017. Vol. 19. P. 4469. doi 10.1039/C7GC02141K
26. Arrachart G., Couturier J., Dourdain S., Levard C., Pellet-Rostaing S. // Processes. 2021. Vol. 9. 1202. doi 10.3390/pr9071202
27. Turanov A.N., Karandashev V.K., Baulin V.E. // Solvent Extr. Ion Exch. 2008. Vol. 26. P. 77. doi 10.1080/07366290801904871
28. Turanov A.N., Karandashev V.K., Baulin V.E. // Solvent Extr. Ion Exch. 2010. Vol. 28. P. 367. doi 10.1080/07366291003684238
29. Turanov A.N., Karandashev V.K., Khvostikov V.A. // Solvent Extr. Ion Exch. 2017. Vol. 35. P. 461. doi 10.80/07366299.2017.1355170
30. Venkateswara Rao Ch., Rout A., Venkatesan K.A. // Sep. Purif. Technol. 2019. Vol. 213. P. 545. doi 10.1016/j.seppur.2018.12.076
31. Katsuta S., Yoshimoto Y., Okai M., Takeda Y., Bessho K. // Ind. Eng. Chem. Res. 2011. Vol. 50. P. 12735. doi 10.1021/ie201310v
32. Nash K.L., Jensen M.P. // Sep. Sci. Technol. 2001. Vol. 36. N 5–6. P. 1257. doi 10.1081/SS-100103649
33. Binnemans K. // Chem. Rev. 2007. Vol. 107. P. 2592. doi 10.1021/cr050979c
34. Sasaki Y., Choppin G.R. // Anal. Sci. 1996. Vol. 12. P. 225. doi 10.2116/analsci.12.225
35. Bonhote P., Dias A.P., Papageorgiou N., Kalyanasundaram K., Grätzel M. // Inorg. Chem. 1996. Vol. 35. P. 1168. doi 10.1021/ic951325x

Extraction of REE(III) from Nitric Acid Media with Tetraoctyldiglycolamide into Trioctylammonium Bis[(trifluoromethyl)sulfonyl]imide

A. N. Turanov^a, V. K. Karandashev^b, V. A. Khvostikov^b, V. E. Baulin^c, and D. V. Baulin^{d*}

^a Osipyan Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia

^b Institute of Microelectronics Technology and High Purity Materials, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia

^c Institute of Physiologically Active Substances of the Federal Federal Research Center for Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry, Chernogolovka, 142432 Russia

^d Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

* e-mail: badmitriy@gmail.com

Received May 30, 2023; revised July 6, 2023; accepted July 6, 2023

The effect of trioctylammonium bis[(trifluoromethyl)sulfonyl]imide ionic liquid on the extraction of REE(III) with tetraoctyldiglycolamide from nitric acid solutions was studied. It was found that in the presence of an ionic liquid in the organic phase, the efficiency and selectivity of the extraction of metal ions from nitric acid solutions increases significantly. The influence of the acidity of the aqueous phase on the change in the distribution ratios of REE(III) was considered, and the stoichiometry of the extractable complexes was determined.

Keywords: extraction, REE(III), tetraoctyldiglycolamide, ionic liquids