

ЭКСТРАКЦИЯ РЗЭ(III), U(VI) И Th(IV) ИЗ ХЛОРНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ 2,6-БИС(ДИФЕНИЛФОСФОРИЛМЕТИЛ)ПИРИДИН- N-ОКСИДОМ

© 2021 г. А. Н. Туранов^{а,*}, В. К. Карандашев^б, В. А. Хвостиков^б,
В. Е. Баулин^{в,з}, А. Ю. Цивадзе^з

^а Институт физики твердого тела РАН, 142432, Черноголовка Московской обл., ул. Акад. Осипьяна, д. 2

^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

^з Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН,
119991, Москва, Ленинский пр., д. 31., корп. 4

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

Получена 28.07.2019, после доработки 23.09.2019, принята к публикации 30.09.2019

Изучена экстракция микроколичеств РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) из растворов HClO₄ растворами 2,6-бис(дифенилфосфорилметил)пиридин-N-оксида (**I**) в 1,2-дихлорэтаноле в зависимости от концентрации HClO₄ в равновесной водной фазе, определена стехиометрия экстрагируемых комплексов. Показано, что из разбавленных растворов HClO₄ соединение **I** экстрагирует РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) значительно более эффективно, чем из растворов HNO₃. При увеличении концентрации кислот величина “перхлоратного” эффекта при экстракции РЗЭ(III) и U(VI) снижается, а Th(IV) экстрагируется соединением **I** из растворов HClO₄ менее эффективно, чем из растворов HNO₃.

Ключевые слова: экстракция, редкоземельные элементы(III), уран(VI), торий(IV), 2,6-бис(дифенилфосфорилметил)пиридин-N-оксид

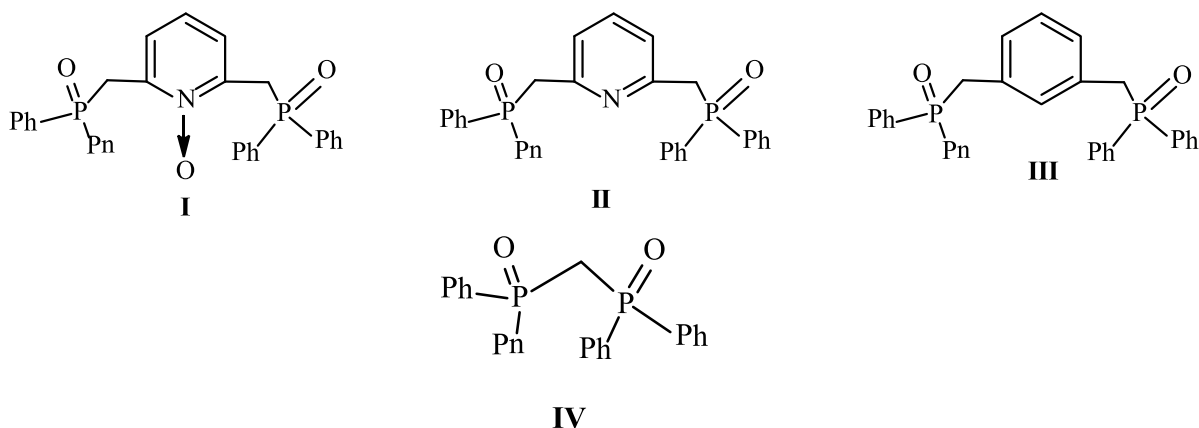
DOI: 10.31857/S0033831121010056

Бидентатные нейтральные фосфорорганические соединения (БНФОС), такие как диоксиды замещенных алкилендифосфинов (ДОДФ) и оксиды диарил(диалкилкарбамоилметил)фосфинов (КМФО), обладают высокой экстракционной способностью по отношению к актинидам и редкоземельным элементам (РЗЭ) в азотнокислых средах и используются для их концентрирования и разделения в экстракционных [1–3] и сорбционных системах [4]. Было показано, что при переходе от азотнокислых к хлорнокислым средам экстракция U(VI), Am(III) и РЗЭ(III) растворами ДОДФ [5–7], КМФО [8–10], другими БНФОС [11], а также замещенными дигликолямидами [12, 13] и дипиколиламидами [14] значительно возрастает. Возможные причи-

ны такого “перхлоратного” эффекта обсуждались в ряде работ [5, 6, 15, 16]. Этот эффект использован для увеличения эффективности концентрирования U(VI), Am(III) и РЗЭ(III) из растворов азотной и фосфорной кислот при добавке небольших количеств HClO₄ или перхлоратов щелочных металлов в водную фазу [7, 8].

Высокой экстракционной способностью по отношению к Am(III), U(VI), Th(IV) и РЗЭ(III) в азотнокислых и солянокислых средах обладает 2,6-бис(дифенилфосфорилметил)пиридин-N-оксид (**I**) [17–19]. Методом рентгеноструктурного анализа установлено, что соединение **I** является тридентатным лигандом при комплексообразовании с ионами РЗЭ(III) и Th(IV) [20]. Тетраалкилзамещенные ана-

Схема 1



логи соединения **I** экстрагируют РЗЭ(III) из азотно-кислых растворов значительно менее эффективно [21–23], что указывает на проявление эффекта аномального арильного упрочнения экстрагируемых комплексов (ЭААУ) [24] в системах с этими соединениями. По своей экстракционной способности по отношению к Th(IV) и РЗЭ(III) в азотнокислых средах триоксид **I** существенно превосходит диоксид тетрафенилметилендиоксида **IV** – один из наиболее эффективных экстрагентов актинидов и РЗЭ(III) [19].

Влияние аниона ClO_4^- на эффективность экстракции ионов металлов соединением **I** ранее не исследовалось. В настоящей работе рассмотрены некоторые закономерности распределения ионов U(VI), Th(IV) и РЗЭ(III) между водными растворами HClO_4 и NaClO_4 и растворами триоксида **I** в 1,2-дихлорэтано. Для сравнения приведены данные по экстракции диоксидами **II–IV** (схема 1).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез 2,6-бис(дифенилфосфорилметил)пиридина (**II**) описан в работе [25], 2,6-бис(дифенилфосфорилметил)пиридин N-оксид (**I**) получен окислением соединения **II** пероксидом водорода согласно методике [20]. Диоксид тетрафенилметилендифосфина (**IV**) и 2,6-бис(дифенилфосфорилметил)бензол (**III**) получены по известным методикам [26, 27].

В экспериментах по экстракции в качестве органического растворителя использовали 1,2-дихлорэтан х.ч. без дополнительной очистки. Растворы реагентов готовили по точным навескам.

Межфазное распределение ионов U(VI), Th(IV) и РЗЭ(III) изучали на модельных растворах 0.003–6 моль/л HClO_4 или 0.01 моль/л NaClO_4 . Исходная концентрация ионов U(VI), Th(IV) и каждого из РЗЭ(III) составляла 2×10^{-6} моль/л. Опыты по экстракции проводили в пробирках с пришлифованными пробками при комнатной температуре и соотношении объемов органической и водной фаз 1 : 1. Контакт фаз осуществляли на аппарате для перемешивания со скоростью 60 об/мин в течение 1 ч, что достаточно для установления постоянных значений коэффициентов распределения (D).

Концентрацию U(VI), Th(IV) и РЗЭ(III) в исходных и равновесных водных растворах определяли методом масс-спектрометрии с ионизацией в индуктивно связанной плазме с использованием масс-спектрометра X-7 (Thermo Elemental, США) по ранее описанной методике [28]. Содержание элементов в органической фазе определяли после реэкстракции раствором 0.1 моль/л оксиэтилендифосфоновой кислоты, которая образует устойчивые комплексы с ионами металлов в водной фазе [29]. Коэффициенты распределения элементов (D) рассчитывали как отношение их концентраций в равновесных фазах. Погрешность определения коэффициентов распределения не превышала 5%. Концентрацию HClO_4 в равновесных водных фазах определяли потенциометрическим титрованием стандартизированным раствором NaOH. Концентрацию ионов ClO_4^- в органической фазе определяли экстракционно-фотометрическим методом с метиленовым синим при $\lambda = 655$ нм [30] с использованием спектрофотометра UNICO

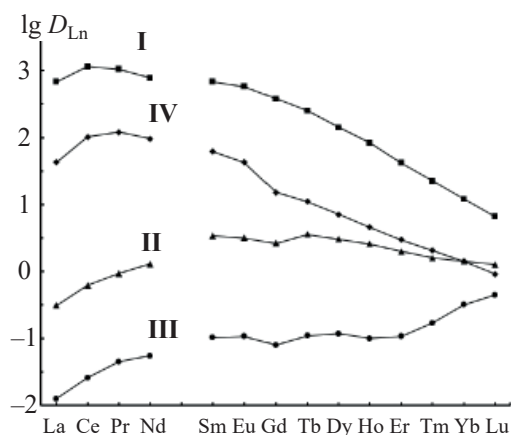


Рис. 1. Экстракция РЗЭ (III) из раствора 0.01 моль/л NaClO_4 растворами 0.001 моль/л соединения I, 0.005 моль/л соединений II и IV и 0.01 моль/л соединения III в дихлорэтане. pH 4.1.

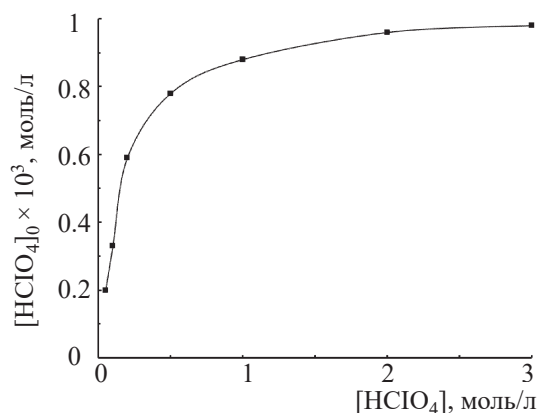


Рис. 2. Экстракция HClO_4 раствором 0.001 моль/л соединения I в дихлорэтане.

1201 (United Products & Instruments Inc., США). Параллельно определяли содержание HClO_4 в органической фазе при экстракции чистым дихлорэтаном (холостой опыт). Результаты холостого опыта учитывали при расчете общей концентрации комплексов экстрагентов с HClO_4 в органической фазе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сопоставлена эффективность экстракции РЗЭ(III) соединениями I–IV из слабокислых (pH 4.1) перхлоратных растворов, когда ограничено влияние связывания экстрагента в результате соэкстракции HClO_4 . При экстракции из растворов 0.01 моль/л NaClO_4 триоксид I значительно превосходит по своей экстракционной способности диоксиды II–IV (рис. 1). 2,6-Бис(дифенилфосфорилметил)пиридин II экстрагирует РЗЭ(III) значительно более эффективно, чем диоксид III, что указывает на участие пиридинового атома азота в комплексобразовании с ионами Ln^{3+} . Участие фосфорильных групп и пиридинового атома азота молекулы 2,6-бис(дифенилфосфорил)пиридина в комплексобразовании с ионом La^{3+} установлено методом ЯМР [31]. Диоксид IV существенно превосходит соединение II по своей экстракционной способности по отношению к легким РЗЭ(III), однако различие в экстракционной способности этих соединений, $D_{\text{Ln}}(\text{IV})/D_{\text{Ln}}(\text{II})$, снижается по мере увеличения атомного номера (Z) РЗЭ (рис. 1). Структура мостика между фосфорильными группами в моле-

кулах соединений I–IV заметно влияет на внутригрупповую селективность экстракции РЗЭ(III) (рис. 1). Для соединений I и IV наблюдается уменьшение D_{Ln} по мере увеличения Z. Такой же характер зависимости $\lg D_{\text{Ln}}-Z$ отмечался при экстракции РЗЭ(III) из нитратных растворов БНФОС с метиленовым мостиком между фосфорильными группами [32–34]. Ранее отмечалось, что увеличение длины алкиленового мостика в молекулах диоксидов $\text{Ph}_2\text{P}(\text{O})(\text{CH}_2)_n\text{P}(\text{O})\text{Ph}_2$ приводит к инверсии зависимости $\lg D_{\text{Ln}}-Z$ [35]. Следствием этого является последовательное уменьшение величины фактора разделения La и Lu ($\beta_{\text{La/Lu}} = D_{\text{La}}/D_{\text{Lu}}$) в ряду этих диоксидов по мере увеличения n [35]. При экстракции диоксидом III наблюдается тенденция увеличения D_{Ln} в ряду РЗЭ(III) от La(III) к Lu(III) (рис. 1).

Поскольку экстракция ионов металлов из растворов кислот нейтральными экстрагентами сопровождается взаимодействием экстрагента и кислоты, приводящим к снижению концентрации свободного экстрагента в равновесной органической фазе, рассмотрено распределение HClO_4 между фазами в процессе экстракции. Из данных, представленных на рис. 2, видно, что хлорная кислота образует с триоксидом I комплекс состава 1 : 1. Отметим, что экстракционная способность соединения I по отношению к HClO_4 значительно превышает таковую оксида дифенил(дибутилкарбамоилметил)фосфина (КМФО Ph_2Bu_2) и диоксида IV: при равной кислотности водной фазы концентрация HClO_4 в равновесной органической фазе, содержащей со-

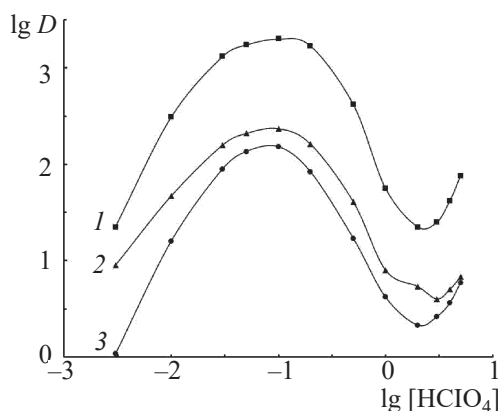


Рис. 3. Зависимость коэффициентов распределения Th(IV) (1), U(VI) (2) и Eu(III) (3) от концентрации HClO_4 в равновесной водной фазе при экстракции растворами 0.0001 моль/л соединения **I** в дихлорэтано.

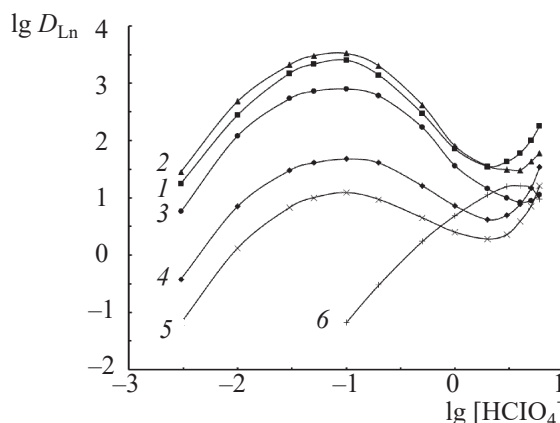


Рис. 4. Зависимость коэффициентов распределения Eu(III) (1, 6), Nd(III) (2), Tm(III) (3), Lu(III) (4) и La(III) (5) от концентрации HClO_4 в равновесной водной фазе при экстракции растворами 0.0003 моль/л соединений **I** (1–5) и **IV** (6) в дихлорэтано.

единение **I**, существенно выше, чем при экстракции растворами КМФО Ph_2Bu_2 [9, 36] и диоксида **IV** [6]. Более высокая экстракционная способность 2-нонилпиридин-*N*-оксида по сравнению с триизоамилфосфиноксидом отмечалась при экстракции хлорной кислоты растворами этих соединений в дихлорэтано [37].

Рассмотрено влияние концентрации HClO_4 в водной фазе на экстракцию U(VI), Th(IV) и РЗЭ(III) растворами реагента **I** в дихлорэтано. При этом наблюдаются две области концентрации HClO_4 , резко отличающиеся характером зависимости $\lg D$ – $[\text{HClO}_4]$ (рис. 3, 4). В области концентрации HClO_4 от 0.003 до 2 моль/л наблюдаются зависимости $\lg D$ – $[\text{HClO}_4]$ с максимумами, что связано с высаливающим действием ионов ClO_4^- и связыванием экстрагента хлорной кислотой. Влияние последнего фактора особенно заметно проявляется при $[\text{HClO}_4] > 0.1$ моль/л. По-видимому, в диапазоне концентрации HClO_4 от 0.003 до 2 моль/л экстракция U(VI), Th(IV) и РЗЭ(III) осуществляется по механизму координационной сольватации ионов металлов нейтральным экстрагентом. Дальнейшее увеличение концентрации HClO_4 в водной фазе от 2 до 6 моль/л сопровождается ростом коэффициентов распределения U(VI), Th(IV) и Eu(III)–Lu(III). При экстракции Nd(III) и La(III) рост D_{Ln} наблюдается при $[\text{HClO}_4]$ выше 3 и 4 моль/л соответственно (рис. 4). По-видимому, при экстракции из растворов с $[\text{HClO}_4] > 2$ моль/л в комплексообразовании с

ионами металлов участвуют комплексы триоксида **I** с HClO_4 , концентрация которых в органической фазе растет с ростом концентрации HClO_4 в водной фазе. Поскольку увеличение $[\text{HClO}_4]$ в водной фазе в большей степени влияет на увеличение D_{Ln} при экстракции тяжелых РЗЭ(III), с ростом $[\text{HClO}_4]$ от 0.1 до 6 моль/л величина фактора разделения $\beta_{\text{La/Lu}}$ снижается от 63 до 0.6. Эффективность экстракции U(VI), Th(IV) и РЗЭ(III) соединением **I** из слабых кислотных (0.05–0.3 моль/л) растворов HClO_4 значительно выше, чем при экстракции из растворов 3 моль/л HClO_4 (рис. 3, 4). Это может связано с более высокой устойчивостью комплексов, образуемых в результате координационной сольватации ионов металлов нейтральным лигандом **I**.

Отметим, что характер зависимости $\lg D_{\text{Ln}}$ – $[\text{HClO}_4]$ при экстракции растворами триоксида **I** и БНФОС существенно различается: в случае экстракции Eu(III) раствором диоксида **IV** наблюдается увеличение D_{Eu} с ростом $[\text{HClO}_4]$ от 0.1 до 3–4 моль/л, после чего D_{Eu} снижается с увеличением $[\text{HClO}_4]$ (рис. 4). Аналогичные зависимости наблюдались при экстракции Am(III) растворами диоксида **IV** [6] или КМФО Ph_2Bu_2 [9].

Стехиометрическое соотношение металл : экстрагент в экстрагируемых комплексах определено методом разбавления. Полученные данные (рис. 5) показывают, что соединение **I** экстрагирует РЗЭ(III) и Th(IV) из растворов 0.1 моль/л HClO_4 в основном в форме трисольватов, а U(VI) – в форме моно- и

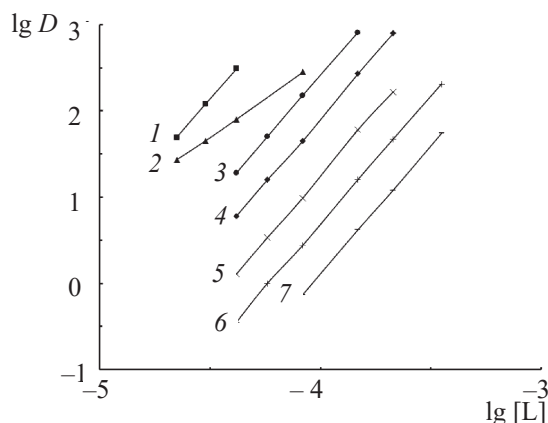


Рис. 5. Зависимость коэффициентов распределения Th(IV) (1), U(VI) (2), Eu(III) (3), La(III) (4), Ho(III) (5), Tm(III) (6) и Lu(III) (7) от концентрации соединения I в дихлорэтано при экстракции из раствора 0.1 моль/л HClO_4 .

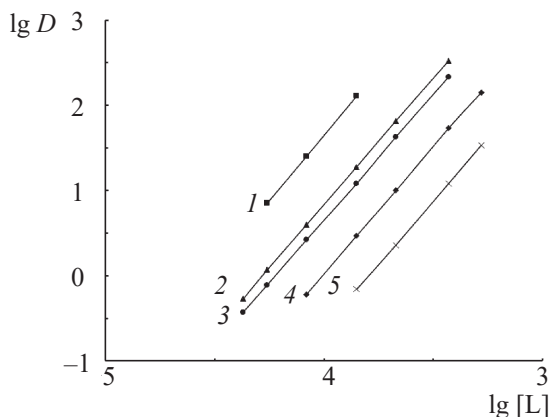


Рис. 6. Зависимость коэффициентов распределения Th(IV) (1), U(VI) (2), Eu(III) (3), La(III) (4) и Lu(III) (5) от концентрации соединения I в дихлорэтано при экстракции из раствора 3 моль/л HClO_4 .

дисольватов. Ранее было показано [19], что из азотнокислых растворов соединение I в дихлорэтано экстрагирует РЗЭ(III) и Th(IV) в виде дисольватов, а U(VI) – в форме моно- и дисольватов. Различие в стехиометрии комплексов РЗЭ(III) и Th(IV), экстрагируемых из растворов HClO_4 и HNO_3 , связано со слабой координирующей способностью ионов ClO_4^- , что исключает их непосредственную координацию с ионами экстрагируемых металлов, в то время как при экстракции из нитратных сред отмечалась координация ионов NO_3^- с катионами Ln^{3+} [20].

Стехиометрическое соотношение металл : экстрагент в комплексах РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) с триоксидом I, экстрагируемых из растворов 3 моль/л HClO_4 , близко к 1 : 3 (рис. 6).

Проведено сопоставление экстракционной способности триоксида I и диоксида IV по отношению к РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV). При экстракции Eu(III) из раствора 0.1 моль/л HClO_4 растворами 3×10^{-4} моль/л соединений I и IV в дихлорэтано значения $\lg D_{\text{Eu}}$ составляют 3.4 и –1.15 соответственно, а величина $D_{\text{Eu}}(\text{I})/D_{\text{Eu}}(\text{IV})$ равна 3.5×10^4 . При экстракции Th(IV) в этих условиях $D_{\text{Th}}(\text{I})/D_{\text{Th}}(\text{IV}) = 165$. Эти данные указывают на то, что триоксид I существенно превосходит диоксид IV по своей экстракционной способности по отношению к Th(IV) и РЗЭ(III). Одной из причин этого может быть увеличение в молекуле I числа координирующих групп, принимающих участие в комплексообразовании с извлекаемыми ионами. При экстракции U(VI) из раствора 0.1 моль/л HClO_4 различие в экстракцион-

ной способности соединений I и IV проявляется в значительно меньшей степени: $D_{\text{U}}(\text{I})/D_{\text{U}}(\text{IV}) = 4.2$. Это может быть связано с линейным строением катиона UO_2^{2+} , препятствующим его взаимодействию со всеми тремя координирующими группами лиганда I.

В области умеренной и высокой концентрации HClO_4 различие в экстракционной способности соединений I и IV по отношению к РЗЭ(III) значительно снижается. При экстракции Eu(III) из раствора 3 моль/л HClO_4 растворами 3×10^{-4} моль/л соединений I и IV в дихлорэтано значения $\lg D_{\text{Eu}}$ составляют 1.64 и 1.19 соответственно, а $D_{\text{Eu}}(\text{I})/D_{\text{Eu}}(\text{IV}) = 2.8$. В аналогичных условиях U(VI) и Th(IV) экстрагируются триоксидом I значительно менее эффективно, чем диоксидом IV: $D_{\text{U}}(\text{IV})/D_{\text{U}}(\text{I}) = 130$, а $D_{\text{Th}}(\text{IV})/D_{\text{Th}}(\text{I}) = 8.5$.

Сопоставление значений D_{Ln} при экстракции РЗЭ(III) триоксидом I из растворов HClO_4 и HNO_3 [19] показало, что из растворов хлорной кислоты РЗЭ(III) экстрагируются более эффективно, чем из растворов азотной кислоты. Величина “перхлоратного” эффекта, обычно выражаемая как отношение коэффициентов распределения ионов металлов при экстракции из растворов, содержащих ионы ClO_4^- и NO_3^- , в сопоставимых условиях, $K(\text{ClO}_4^-/\text{NO}_3^-) = D_{\text{Ln}}(\text{ClO}_4)/D_{\text{Ln}}(\text{NO}_3)$, снижается с ростом концентрации соответствующих кислот. Так при экстракции Eu(III) растворами триоксида I в дихлорэтано увеличение концентрации кислот от 0.3 до 3 моль/л сопровождается снижением величины $K(\text{ClO}_4^-/\text{NO}_3^-)$

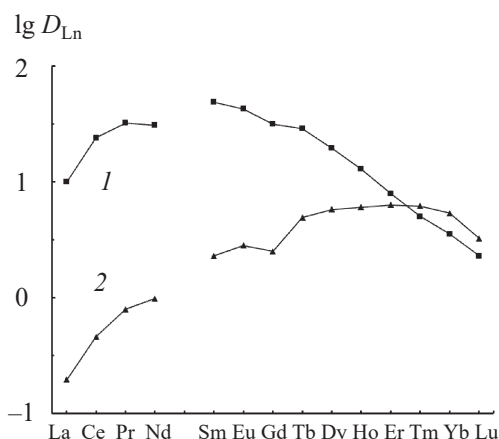


Рис. 7. Экстракция РЗЭ (III) из растворов 3 моль/л HClO_4 (1) и 3 моль/л HNO_3 (2) растворами 0.0003 моль/л соединения **I** в дихлорэтано.

от 3400 до 16. При экстракции из растворов 3 моль/л HClO_4 и HNO_3 значения $K(\text{ClO}_4^-/\text{NO}_3^-)$ уменьшаются в ряду РЗЭ(III) от 51 для La(III) до 1.3 для Er(III), а Tm(III), Yb(III) и Lu(III) экстрагируются из раствора HNO_3 даже несколько более эффективно, чем из раствора HClO_4 (рис. 7). Поскольку стехиометрическое соотношение $\text{Ln} : \text{I}$ увеличивается от 2 до 3 при переходе от азотнокислых сред к хлорноокислым, увеличение концентрации экстрагента в органической фазе приводит к увеличению величины “перхлоратного” эффекта в системе с триоксидом **I**. При экстракции Eu(III) и U(VI) раствором 1×10^{-4} моль/л соединения **I** в дихлорэтано из растворов 3 моль/л HClO_4 и HNO_3 величины $K(\text{ClO}_4^-/\text{NO}_3^-)$ составляют 5.5 и 8.7 соответственно. Th(IV) в этих условиях экстрагируется из раствора HClO_4 менее эффективно, чем из раствора HNO_3 [$K(\text{ClO}_4^-/\text{NO}_3^-) = 0.02$].

В системах с БНФОС “перхлоратный” эффект проявляется в значительно большей степени, чем в системе с триоксидом **I**: при экстракции Eu(III) растворами КМФО Ph_2Bu_2 или диоксида **IV** из растворов 3 моль/л HClO_4 и HNO_3 величины $K(\text{ClO}_4^-/\text{NO}_3^-)$ составляют 3×10^5 [38] и >1000 [16] соответственно. Резкое различие в экстракционном поведении триоксида **I** и БНФОС в растворах HClO_4 может быть связано с более высокой устойчивостью протонированного комплекса, образуемого соединением **I**, приводящей к более заметному снижению D_{Eu} в результате соэкстракции HClO_4 . Отмечалось, что изменение структуры БНФОС, приводящее к увеличению основности реагента, например, при за-

мене фенильных радикалов при атоме фосфора на алкильные или при увеличении длины алкиленового мостика между группами P(O) молекулы ДОДФ, способствует повышению экстракции HNO_3 и HClO_4 [9, 39], что приводит к значительному снижению величины “перхлоратного” эффекта [7, 16].

Представленные данные показали, что структура фрагмента, соединяющего фосфорильные группы в молекуле экстрагента, оказывает существенное влияние как на экстракционную способность в перхлоратных средах, так и на порядок экстрагируемости в ряду РЗЭ(III). 2,6-Бис(дифенилфосфорилметил)пиридин-*N*-оксид обладает высокой экстракционной способностью по отношению к РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) в перхлоратных средах. Из слабокислых растворов HClO_4 триоксид **I** экстрагирует эти элементы значительно более эффективно, чем диоксид тетрафенилметилendifосфина. “Перхлоратный” эффект в системе с соединением **I** заметно проявляется при экстракции U(VI), Th(IV) и РЗЭ(III) только в области низкой концентрации HClO_4 в водной фазе. По мере увеличения концентрации кислот величина “перхлоратного” эффекта снижается, а при концентрациях кислот выше 1 моль/л ионы Th(IV) экстрагируются соединением **I** из растворов HClO_4 менее эффективно, чем из растворов HNO_3 , что связано с высокой экстракционной способностью этого соединения по отношению к HClO_4 .

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках Государственного задания 2019 г. ИФТТ РАН, ИПТМ РАН, ИФАВ РАН и ИФХЭ РАН при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 18-29-24069).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розен А.М., Волк В.И., Вахрушин А.Ю. и др. // Радиохимия. 1999. Т. 41, № 3. С. 205–211.
2. ЧмUTOва М.К., Литвина М.Н., Прибылова Г.А. и др. // Радиохимия. 1999. Т. 41, № 4. С. 331–335.
3. Мaстриюкова Т.А., Артюшин О.И., Одинец И.Л., Тананаев И.Г. // Рос. хим. журн. 2005. Т. 49, № 2. С. 86–96.

4. Мясоедова Г.В. // Рос. хим. журн. 2005. Т. 49, № 2. С. 72–75.
5. Mrochek J.E., Banks C.V. // J. Inorg. Nucl. Chem. 1965. Vol. 27. P. 589–601.
6. Розен А.М., Николотова З.И., Карташева Н.А., Большакова А.С. // Радиохимия. 1978. Т. 20, № 5. С. 725–734.
7. Smirnov I.V., Babain V.A., Shadrin A.Yu. et al. // Solvent Extr. Ion Exch. 2005. Vol. 23. P. 1–21.
8. Чмутова М.К., Юссонья М., Литвина М.Н. и др. // Радиохимия. 1990. Т. 32, № 4. С. 56–61.
9. Чмутова М.К., Литвина М.Н., Нестерова Н.П. и др. // Радиохимия. 1990. Т. 32, № 5. С. 88–95.
10. Chmutova M.K., Litvina M.N., Nesterova N.P. et al. // Solvent Extr. Ion Exch. 1992. Vol. 10, N 3. P. 439–458.
11. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Яркевич А.Н., Сафронова З.В. // Радиохимия. 2011. Т. 53, № 3. С. 225–228.
12. Tachimori S., Sasaki Y., Suzuki S. // Solvent Extr. Ion Exch. 2002. Vol. 20. P. 687–699.
13. Turanov A.N., Karandashev V.K., Baulin V.E. // Solvent Extr. Ion Exch. 2008. Vol. 26, p. 77–99.
14. Аляпишев М.Ю., Бабаин В.А., Антонов Н.Г., Смирнов И.В. // ЖПХ. 2006. Т. 79, № 11. С. 1827–1835.
15. Nash K. // Sep. Sci. Technol. 1999. Vol. 34. P. 911–929.
16. Смирнов И.В. // Радиохимия. 2007. Т. 49, № 1. С. 40–49.
17. Bond E.M., Engelhardt U., Deere T.P. et al. // Solvent Extr. Ion Exch. 1997. Vol. 15. P. 381–400.
18. Bond E.M., Engelhardt U., Deere T.P. et al. // Solvent Extr. Ion Exch. 1998. Vol. 16. P. 967–983.
19. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Калашикова И.П. и др. // Радиохимия. 2018. Т. 60, № 3. С. 213–216.
20. Rapko B.M., Duesler E.N., Smith P.H. et al. // Inorg. Chem. 1993. Vol. 32. P. 2164–2174.
21. Nash K.L., Lavallette C., Borkowski M. et al. // Inorg. Chem. 2002. Vol. 41. P. 5849–5858.
22. Sulakova J., Paine R.T., Chakravarty M., Nash K.L. // Sep. Sci. Technol. 2012. Vol. 47. P. 2015–2023.
23. Rosario-Amorin D., Ouizem S., Dickie D.A. et al. // Inorg. Chem. 2013. Vol. 52. P.3063–3083.
24. Розен А.М., Николотова З.И., Карташева Н.А., Юдина К.С. // ДАН СССР. 1975. Т. 222, № 5. С. 1151–1154.
25. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Баулин В.Е. // ЖНХ. 1998. Т. 43, № 2. С. 332–338.
26. Чаузов В.А., Студнев Ю.Н., Износткова М.Г., Фокин А.В. // ЖОХ. 1987. Т. 57, № 1. С. 54–58.
27. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Баулин В.Е. и др. // ЖНХ. 2015. Т. 60, № 8. С. 1117–1123.
28. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Баулин В.Е., Цветков Е.Н. // ЖНХ. 1995. Т. 40, № 11. С. 1926–1930.
29. Nash K.L. // Radiochim. Acta. 1991. Vol. 54. P. 171–179.
30. Хольцбехер З., Дивиш Л., Крал М. и др. Органические реагенты в неорганическом анализе. М.: Мир. 1979. 752 с.
31. Matveev P.I., Borisova N.E., Andreadi N.G. et al. // Dalton Trans. 2019. Vol. 48. P. 2554–2559.
32. Литвина М.Н., Чмутова М.К., Мясоедов Б.Ф., Кабачник М.И. // Радиохимия. 1996. Т. 38, № 6. С. 525–530.
33. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Баулин В.Е. // Радиохимия. 2001. Т. 43, № 1. С. 66–71.
34. Horwitz E.P., Martin K.A., Diamond H., Kaplan L. // Solvent Extr. Ion Exch. 1986. Vol. 4, N 3. P. 449–494.
35. Turanov A.N., Karandashev V.K., Baulin V.E. et al. // Solvent Extr. Ion Exch. 2009. Vol. 27, N 4. P. 551–578.
36. Стоянов Е.С., Воробьева Т.П., Смирнов И.В. // ЖСХ. Т. 44, № 3. С. 414–424.
37. Торгов В.Г., Николаева И.В., Дроздова М.К. // ЖНХ. 1999. Т. 44, № 6. С. 1043–1049.
38. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Баулин В.Е., Баулин Д.В. // Радиохимия. 2019. Т. 61, № 2. С. 117–121.
39. Розен А.М., Беркман З.А., Бертина Л.Э. и др. // Радиохимия. 1976. Т. 18, № 4. С. 493–501.