

ВЛИЯНИЕ СТРОЕНИЯ ДИОКСИДОВ (*О*-ФЕНИЛЕНОКСИМЕТИЛЕН)ДИФОСФИНОВ НА ИХ ЭКСТРАКЦИОННУЮ СПОСОБНОСТЬ ПО ОТНОШЕНИЮ К U(VI), Th(IV) И РЗЭ(III) В АЗОТНОКИСЛЫХ СРЕДАХ

© 2022 г. А. Н. Туранов^{а,*}, В. К. Карандашев^б, А. Н. Яркевич^в,
Д. В. Баулин^г, В. Е. Баулин^г

^а Институт физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна,
142432, Черноголовка Московской обл., ул. Академика Осипьяна, д. 2

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

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

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

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

Поступила в редакцию 12.10.2020, после доработки 28.12.2020, принята к публикации 30.12.2020

Изучена экстракция микроколичеств U(VI), Th(IV) и РЗЭ(III) из азотнокислых растворов растворами диоксидов (*о*-фениленоксиметилен)дифосфинов с фенильными и бутильными заместителями при атоме фосфора во фрагменте $\text{OCH}_2\text{P}(\text{O})\text{R}_2$. Определена стехиометрия извлекаемых комплексов. Рассмотрено влияние строения экстрагента, концентрации HNO_3 в водной фазе и природы органического растворителя на эффективность извлечения ионов РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) в органическую фазу. Представленные данные показали, что фосфорильные группы в молекуле диоксида (*о*-фениленоксиметилен)дифосфина неэквивалентны. В отличие от заметного снижения эффективности экстракции РЗЭ(III) из азотнокислых растворов при замене фенильных радикалов на бутильные в фосфорильной группе $\text{P}(\text{O})\text{R}_2$, непосредственно присоединенной к фениленовому кольцу, замена в молекуле диоксида фрагмента $\text{OCH}_2\text{P}(\text{O})\text{Ph}_2$ на $\text{OCH}_2\text{P}(\text{O})\text{Bu}_2$ лишь незначительно снижает коэффициенты распределения РЗЭ(III) в таких средах. В то же время эффективность экстракции U(VI) и Th(IV) из азотнокислых растворов при такой замене возрастает.

Ключевые слова: экстракция, уран(VI), торий(IV), РЗЭ(III), диоксиды (*о*-фениленоксиметилен)дифосфинов.

DOI: 10.31857/S0033831122010026

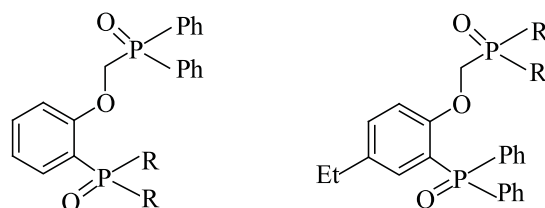
Экстракционные методы широко используются для извлечения, концентрирования и разделения актинидов и редкоземельных элементов (РЗЭ) из азотнокислых растворов, получаемых при переработке отработанного ядерного топлива [1]. Высокой экстракционной способностью по отношению к этим элементам обладают полидентатные 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, 9], фосфорилированные пиридин-*N*-оксиды [10], а также ациклические аналоги краун-эфиров – поданды с амидными [11–13] или фосфорильными [14–16] концевыми группами.

Экстракционная способность и селективность фосфорилсодержащих подандов (ФП) существенно зависит от длины полиэфирной цепи, структуры мостика между эфирным атомом кислорода и РО-группой, а также природы заместителя при атомах фосфора [14–16]. 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) [16]. Среди этих соединений диоксиды тетраарилзамещенных (*o*-фениленоксиметилен)дифосфинов обладают наиболее высокой экстракционной способностью по отношению к ионам актинидов и РЗЭ(III) [16], превосходя таковую КМФО. В изученных ранее системах с диоксидами (*o*-фениленоксиметилен)дифосфинов **I** и **II** замена фенильных заместителей при фосфорильной группе, непосредственно соединенной с *o*-фениленовым фрагментом, на бутильные приводит к резкому снижению экстракционной способности соединения **II** по отношению к Am(III) и РЗЭ(III) в азотнокислых средах [14]. Это связано с проявлением в системах с реагентами **I** и **II** эффекта аномального арильного упрочнения экстрагируемых комплексов (ЭААУ) [17], обнаруженного ранее в системах с диоксидами метилендифосфинов [4] и КМФО [5]. Не меньший интерес представляет выяснение особенностей влияния заместителей в фосфорильной группе, отделенной от *o*-фениленового фрагмента оксиметиленовым мостиком, на экстракционную способность реагентов в азотнокислых средах, так как ранее методом рентгеноструктурного анализа показано, что фосфорильные группы в молекуле диоксида **III** не эквивалентны [18, 19]. В настоящей работе изучено влияние природы заместителя при неэквивалентных фосфорильных группах диоксидов (*o*-фениленоксиметилен)дифосфинов на их экстракционную способность по отношению к U(VI), Th(IV) и РЗЭ(III) в азотнокислых средах.

С этой целью исследованы некоторые закономерности межфазного распределения U(VI), Th(IV) и РЗЭ(III) между водными растворами HNO₃ и растворами соединений **III** и **IV** в 1,2-дихлорэтаноле (Схема 1).

Схема 1.

**I** (R = Ph); **II** (R = Bu)**III** (R = Ph); **IV** (R = Bu)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Окись ((2-(дифенилфосфорил)-4-этилфеноксид)метил)дифенилфосфина III получали ранее описанным методом [19], синтез соединения **IV** приведен ниже.

Окись дибутил ((2-(дифенилфосфорил)-4-этилфеноксид)метил) фосфина IV. К суспензии 1.39 г (4.32 ммоль) 2-дифенилфосфорил-4-этилфенола [20] в 35 мл сухого диоксана добавляли 1.40 г (4.33 ммоль) свежепрокаленного карбоната цезия, нагревали до 100°C, перемешивали 0.5 ч, затем добавляли 0.97 г (4.3 ммоль) дибутил(хлорметил)фосфиноксида [21]. Смесь перемешивали при кипении 20 ч и упаривали в вакууме. К остатку добавляли 20 мл воды, подкисляли концентрированной HCl до pH 1 и полученную смесь экстрагировали CHCl₃ (3 × 20 мл). Экстракт последовательно промывали разбавленной (1 : 2) HCl (3 × 20 мл), водой (2 × 20 мл) и упаривали в вакууме. Остаток хроматографировали на колонке с силикагелем марки L, элюент CHCl₃ и CHCl₃-*i*-PrOH (10 : 1). Выделено 0.88 г соединения **IV**, выход 42%, т. пл. 140–142°C (диэтиловый эфир). Найдено, %: C 69.95, 70.19; H 7.61, 7.74; P 12.28, 12.39. C₂₉H₃₈O₃P₂. Вычислено, %: C 70.15; H 7.71; P 12.48. Спектр ЯМР ¹H (CDCl₃), δ, м.д.: 0.87 м (6H, 2CH₃-CH₂CH₂CH₂); 1.08 т (3H, CH₃-CH₂Ar, ³J_{H-H} = 7.2 Гц); 1.41 м (12H, 2CH₃-CH₂CH₂CH₂); 2.49 к (2H, CH₃-CH₂Ar, ³J_{H-H} = 7.5 Гц); 4.15 д (2H, OCH₂P, ²J_{H-P} = 7.6 Гц); 6.86 д (1H, ²J_{H-P} = 7.6 Гц, Ar-H); 6.98 м (1H, Ar-H); 7.50 м (7H, 1 Ar-H + 6H Ph-H); 7.64 м (4H, Ph-H). Спектр ЯМР ³¹P (CDCl₃), δ, м.д.: 29.36; 49.87.

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

Соединение	K_1	K_2
I	2.70 [14]	0.23 [14]
II	8.03 [14]	1.03 [14]
III	2.80 ± 0.13	0.26 ± 0.02
IV	9.18 ± 0.43	1.52 ± 0.08

В качестве органического разбавителя использовали 1,2-дихлорэтан марки х.ч. без дополнительной очистки. Растворы экстрагентов готовили по точным навескам.

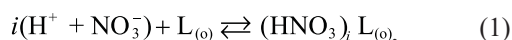
Распределение РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) в экстракционных системах изучали на модельных растворах 0.1–7.0 моль/л HNO_3 . Водные растворы U(VI), Th(IV) и РЗЭ(III) готовили растворением соответствующих нитратов в воде с последующим добавлением HNO_3 . Исходная концентрация ионов металлов составляла 2×10^{-6} моль/л. Контакт фаз осуществляли при комнатной температуре на роторном аппарате для перемешивания со скоростью 60 об/мин в течение 1 ч. Предварительно установлено, что этого времени достаточно для установления постоянных значений коэффициентов распределения элементов (D) в экстракционных системах.

Концентрацию U(VI), Th(IV) и 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 раствором 0.1 моль/л оксиэтилидифосфоновой кислоты. Коэффициенты распределения элементов рассчитывали как отношение их концентраций в равновесных органической и водной фазах. Погрешность определения коэффициентов распределения не превышала 5%.

Концентрацию HNO_3 в равновесной водной фазе определяли потенциометрическим титрованием раствором NaOH, в органической фазе – 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 ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс экстракции ионов металлов из азотно-кислых растворов нейтральными фосфорорганическими соединениями сопровождается взаимодействием HNO_3 с экстрагентом. Поэтому предварительно исследована экстракция HNO_3 растворами соединений **III** и **IV**. Данные по распределению HNO_3 между ее водными растворами и растворами соединений **III** и **IV** в дихлорэтано указывают на то, что при $[\text{HNO}_3] > 2$ моль/л отношение концентрации HNO_3 , связанной в комплексы с экстрагентом, и 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 уравнениями



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 **I** и **II**. Соединения **II** и **IV** с бутильными заместителями при атомах фосфора проявляют более высокую экстракционную способность по отношению к HNO_3 , чем их фенилзамещенные аналоги **I** и **III**, что связано с увеличением донорной способности группы P=O по мере снижения электроотрицательности заместителей при атоме фосфора [22]. Это приводит к более заметному снижению концентрации свободного экстрагента **II** или **IV** в органической фазе, чем в системах с реагентами **I** и **III**.

При экстракции U(VI) и Th(IV) растворами соединений **III** и **IV** в дихлорэтано зависимость коэффициентов распределения U(VI) и Th(IV) от концентрации HNO_3 в равновесной водной фазе характеризуются кривыми с максимумами (рис. 1). Это связано с высаливающим действием ионов NO_3^- и соэкстракцией HNO_3 , приводящей к снижению концентрации свободного экстрагента в органической фазе, и соответствует экстракции ионов U(VI) и Th(IV) в виде координационно-сольватированных нитратов. Смещение положения максимума на кривой зависимости D – $[\text{HNO}_3]$ в область меньшей кислотности водной фазы при экстракции U(VI) и Th(IV) растворами бутилзамещенного диоксида **IV** соответствует увеличению основности этого соединения по сравнению с его фенилзамещенным аналогом **III**. В диапазоне концентрации HNO_3 0.1–5 моль/л значения D_U и D_{Th} при экстракции диоксидом **IV** заметно выше, чем при экстракции соединением **III** (рис. 1). Стехиометрическое соотношение металл : экстрагент в экстрагируемых комплексах определено методом сдвига равновесия. Полученные данные показали, что соединения **III** и **IV** экстрагируют U(VI) из азотнокислых растворов в форме моно- и дисольватов (тангенс угла наклона зависимости $\lg D_U - \lg [L]$ равен 1.48 ± 0.08) (см. Дополнительные материалы, рис. S1). В аналогичных условиях диоксиды **I** и **II** также экстрагируют U(VI) в виде моно- и дисольватов [23]. Ионы Th(IV) экстрагируются соединением **IV** из раствора 3 моль/л HNO_3 в основном в виде дисольватов (тангенс угла наклона зависимости $\lg D_{\text{Th}} - \lg [L]$ равен 1.93 ± 0.08), а соединением **III** – в виде моно- и дисольватов (тангенс угла наклона зависимости $\lg D_{\text{Th}} - \lg [L]$ равен 1.78 ± 0.08) (рис. S1). Такое различие в стехиометрии может быть связано с тем, что алкильные заместители (соединение **IV**) создают большие пространственные препятствия вращению фрагментов $\text{R}_2\text{P}(\text{O})$ вокруг связи C–P по сравнению с фенильными (соединение **III**) [24].

Для сравнения экстракционной способности соединений **I–IV** по отношению к U(VI) и Th(IV), а также фактора разделения тория и урана ($\beta_{\text{Th/U}} = D_{\text{Th}}/D_U$) в табл. 2 представлены данные по экстракции U(VI) и Th(IV) из азотнокислых растворов в сопоставимых условиях. Введение этильного заместителя в 4-е положение фениленового фрагмента диоксида **III** приводит к повышению растворимо-

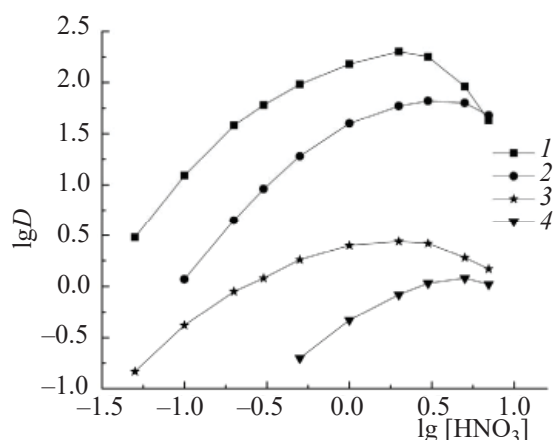


Рис. 1. Зависимость коэффициентов распределения Th(IV) (1, 2) и U(VI) (3, 4) от концентрации HNO_3 в равновесной водной фазе при экстракции растворами 0.002 моль/л соединений **IV** (1, 3) и **III** (2, 4) в дихлорэтано.

сти реагента в органических растворителях и снижению перехода его в водную фазу по сравнению с соединением **I** [19], однако мало влияет на изменение его экстракционной способности по отношению к U(VI) и Th(IV). Эффективность экстракции U(VI) бутилзамещенными диоксидами **II** и **IV** несколько выше, чем их фенилзамещенными аналогами **I** и **III**. Однако такое увеличение значений D_U (в 1.3–2.4 раза) значительно меньше, чем при замене в молекуле монодентатных фосфорорганических экстрагентов двух фенильных радикалов на алкильные, когда константа экстракции урана увеличивалась в 300 раз [25].

При экстракции Th(IV) из азотнокислых растворов замена в молекуле диоксида **II** бутильных радикалов при атоме фосфора на фенильные приводит к заметному повышению D_{Th} для диоксида **I**: отношение $D_{\text{Th}}(\text{I})/D_{\text{Th}}(\text{II}) = 31$. Напротив, аналогичная замена радикалов при атоме фосфора, соединенного с фениленовым фрагментом оксиметиленовым мостиком, в молекуле диоксида **IV** приводит к некоторому снижению величины D_{Th} для диоксида **III**: $D_{\text{Th}}(\text{III})/D_{\text{Th}}(\text{IV}) = 0.37$. Соответственно, бутилза-

Таблица 2. Коэффициенты распределения U(VI) и Th(IV) при их экстракции из раствора 3 моль/л HNO_3 растворами 0.002 моль/л экстрагентов в дихлорэтано

Экстрагент	$\lg D_{\text{Th}}$	$\lg D_U$	$\beta_{\text{Th/U}}$
I [23]	1.81	0.05	57.5
II [23]	0.32	–0.16	3.02
III	1.82	0.03	61.6
IV	2.25	0.42	67.6

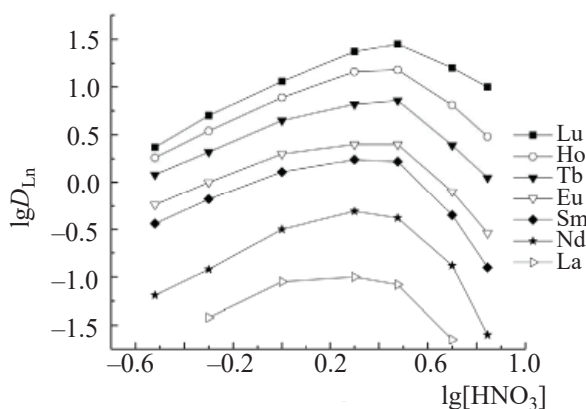


Рис. 2. Зависимость коэффициентов распределения РЗЭ(III) от концентрации HNO_3 в равновесной водной фазе при экстракции растворами 0.01 моль/л соединения III в дихлорэтане.

мещенный диоксид IV экстрагирует Th(IV) значительно более эффективно, чем бутилзамещенный диоксид II: $D_{\text{Th(IV)}}/D_{\text{Th(II)}} = 85$. Следовательно, положение бутильных радикалов при атоме фосфора в молекуле диоксидов II и IV существенно влияет на эффективность экстракции и величину $\beta_{\text{Th/IV}}$ (табл. 2).

Рассмотрено влияние концентрации HNO_3 в равновесной водной фазе на изменение коэффициентов распределения РЗЭ(III) при экстракции растворами соединений III и IV в дихлорэтане (рис. 2, 3). Для этих двух реагентов 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 изменением коэффициентов активности нитратов РЗЭ(III) в зависимости от концентрации HNO_3 . Положение максимума смещается в область более 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, 3). Аналогичный характер зависимостей $D_{\text{Ln}} - [\text{HNO}_3]$ отмечался при экстракции РЗЭ(III) растворами соединений I и II в виде координационно-сольватированных нитратов [15].

Стехиометрическое соотношение металл : экстрагент в экстрагируемых комплексах определено методом сдвига равновесия. Полученные данные

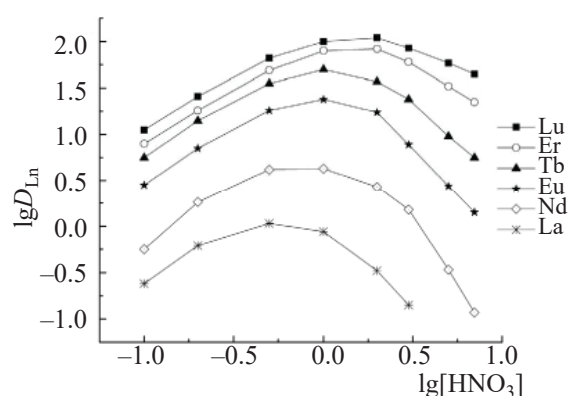


Рис. 3. Зависимость коэффициентов распределения РЗЭ(III) от концентрации HNO_3 в равновесной водной фазе при экстракции растворами 0.1 моль/л соединения IV в дихлорэтане.

(см. Дополнительные материалы, рис. S2, S3) показали, что РЗЭ(III) экстрагируются этими соединениями в виде смеси моно- и дисольватов. В виде комплексов такой же стехиометрии РЗЭ(III) экстрагируются растворами соединений I и II в дихлорэтане [15]. Исходя из полученных данных, процесс экстракции ионов РЗЭ(III) из растворов HNO_3 умеренной концентрации соединениями III и IV в дихлорэтане может быть описан уравнениями:



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

$$D_{\text{Ln}} = [\text{NO}_3^-]^3 \gamma_{\pm}^4 (K_1^{\text{Ln}} [\text{L}]_{(o)} f^{-1} + K_2^{\text{Ln}} [\text{L}]_{(o)}^2 f^{-2}), \quad (6)$$

где γ_{\pm} – коэффициент активности соответствующего нитрата РЗЭ(III) [26], f – поправка на связывание экстрагента азотной кислотой ($f = 1 + K_1 a + K_2 a^2$), приведены в табл. 3. Там же для сравнения приведены значения K_2^{Ln} для соединений I и II.

При экстракции РЗЭ(III) соединениями I–IV из растворов с умеренной концентрацией HNO_3 наблюдается тенденция увеличения 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 .

Экстракционная способность тетрафенилзамещенных диоксидов I и III по отношению к РЗЭ(III)

Таблица 3. Эффективные константы экстракции РЗЭ(III) из растворов HNO₃ растворами соединений **I–IV** в дихлорэтане

Ln(III)	$\lg K_1^{Ln(III)}$	$\lg K_2^{Ln(III)}$	$\lg K_1^{Ln(IV)}$	$\lg K_2^{Ln(IV)}$	$\lg K_2^{Ln(I)}$ [15]	$\lg K_2^{Ln(II)}$ [15]
La(III)	2.52	6.67	2.48	6.11	6.96	5.01
Ce(III)	2.87	7.01	3.04	6.67	7.16	5.10
Pr(III)	3.06	7.22	3.27	6.91	7.40	5.25
Nd(III)	3.20	7.35	3.48	7.12	7.68	5.49
Sm(III)	3.75	7.95	4.03	7.67	7.86	5.66
Eu(III)	3.92	8.09	4.13	7.77	8.01	5.76
Gd(III)	3.93	8.08	3.99	7.63	4.94	5.56
Tb(III)	4.32	8.45	4.55	8.19	8.38	5.80
Dy(III)	4.39	8.54	4.64	8.28	8.49	5.84
Ho(III)	4.42	8.55	4.63	8.26	5.01	5.84
Er(III)	4.41	8.56	4.64	8.27	8.66	5.91
Tm(III)	4.45	8.60	4.68	8.32	8.64	5.86
Yb(III)	4.46	8.61	4.70	8.33	8.62	5.81
Lu(III)	4.47	8.62	4.68	8.31	8.62	5.68

выше, чем их дибутилзамещенных аналогов **II** и **IV**. При этом замена фенильных радикалов при атоме фосфора, непосредственно присоединенного к фениленовому кольцу, на бутильные радикалы приводит к значительно большему снижению значений K_1^{Ln} и K_2^{Ln} , чем при замене в молекуле диоксида **III** фрагмента $OCH_2P(O)Ph_2$ на $OCH_2P(O)Bu_2$ (диоксид **IV**). Соответственно, величина ЭААУ, выражаемая как отношение констант экстракции комплексов металлов одинаковой стехиометрии, при экстракции РЗЭ(III) из азотнокислых растворов диоксидами **I** и **II** ($K_2^{Eu(I)}/K_2^{Eu(II)} = 178$ [15]) значительно выше, чем в системе с диоксидами **III** и **IV** ($K_2^{Eu(III)}/K_2^{Eu(IV)} = 2.09$). По-видимому, фосфорильная группа фрагмента $OCH_2P(O)R_2$ ($R = \text{фенил, бутил}$) молекул диоксидов **III** и **IV** менее чувствительна к изменению характера заместителя при атоме фосфора, чем фосфорильная группа $P(O)R_2$, непосредственно соединенная с фениленовым фрагментом в экстрагентах **I** и **II**.

Представленные данные показали, что фосфорильные группы в молекуле диоксида (*o*-фениленоксиметил)дифосфина неэквивалентны. Замена в молекуле диоксида **III** фрагмента $OCH_2P(O)Ph_2$ на $OCH_2P(O)Bu_2$ приводит к увеличению эффективности экстракции U(VI) и Th(IV) диоксидом **IV** из азотнокислых растворов и снижению коэффициентов распределения РЗЭ(III) в таких средах. Эффект аномального арильного упрочнения экстрагуемых комплексов в системе с диоксидами **III**

и **IV** проявляется в значительно меньшей степени, чем в системе с диоксидами **I** и **II**, в которых замена бутильных радикалов на фенильные происходит в фосфорильной группе, непосредственно соединенной с фениленовым фрагментом.

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, Института физиологически активных веществ РАН (тема № 0090-2019-0008) и Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-29-24069).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Дополнительные материалы для этой статьи доступны по doi 10.31857/S0033831122010026 для авторизованных пользователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Myasoedov B.F., Kalmykov S.N.* // *Mendeleev Commun.* 2015. Vol. 25, N 5. P. 319.
2. *Аляпишев М.Ю., Бабаин В.А., Устынюк Ю.А.* // *Успехи химии.* 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. <https://doi.org/10.1070/RCR4588>]
3. *Leoncini A., Huskens J., Verboom W.* // *Chem. Soc. Rev.* 2017. Vol. 46. P. 7229.
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. Иванова Л.А., Смирнов И.В., Шадрин А.Ю., Мясоедов Б.Ф.* // *Радиохимия.* 1999. Т. 41, № 4. С. 331.
6. *Sartain H.T., McGraw S.N., Lawrence C.L.* // *Inorg. Chim. Acta.* 2015. Vol. 426. P. 126.
7. *Горюнов Е.И., Горюнова И.Б., Баулина Т.В., Петровский П.В., Матросов Е.И., Лысенко К.А., Григорьев М.С., Сафиулина А.М., Моргалюк В.П., Летюшов А.А., Тананаев И.Г., Нифантьев Э.Е., Мясоедов Б.Ф.* // *Росс. хим. журн.* 2010. Т. 54, № 3. С. 45.
8. *Смирнов И.В., Караван М.Д., Ефремова Т.И., Бабаин В.А., Мирошниченко С.И., Черенок С.А., Кальченко В.И.* // *Радиохимия.* 2007. Т. 49, № 5. С. 423.
9. *Kamenik J., Sebesta F., John J., Bohmer V., Rudzevich V., Gruner B.* // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2015. Vol. 304. P. 313. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3543-x>
10. *Ouizem S., Rosrio-Amorin D., Dickie D.A., Paine R.T., de Bettencourt-Dias A., Hay B.P., Podair J., Delmau L.H.* // *Dalton Trans.* 2014. Vol. 43. P. 8368. <https://doi.org/10.1039/C3DT53611D>
11. *Sasaki Y., Sugo Y., Morita K., Nash K.L.* // *Solvent Extr. Ion Exch.* 2015. Vol. 33. P. 625. <https://doi.org/10.1080/07366299.2015.1087209>
12. *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.
13. *Ansari S.A., Mohapatra P.K., Leoncini A., Ali S. M., Singhadeb A., Huskens J., Verboom W.* // *Dalton Trans.* 2017. Vol. 46. P. 11355. <https://doi.org/10.1039/C7DT03831C>
14. *Туранов А.Н., Карандашев В.К., Евсеева Н.К., Баулин В.Е., Ушакова А.П.* // *Радиохимия.* 1999. Т. 41, № 3. С. 219.
15. *Turanov A.N., Karandashev V.K., Baulin V.E.* // *Solv. Extr. Ion Exch.* 1999. Vol. 17. P. 1423. <https://doi.org/10.1080/07366299908934656>
16. *Turanov A.N., Karandashev V.K., Baulin V.E., Yarkevich A.N., Safronova Z.V.* // *Solvent. Extr. Ion Exch.* 2009. Vol. 27. P. 551.
17. *Розен А.М., Николотова З.И., Карташева Н.А., Юдина К.С.* // *ДАН СССР.* 1975. Т. 222, № 5. С. 1151.
18. *Демин С.В., Нефедов С.Е., Баулин В.Е., Демина Л.И., Цивадзе А.Ю.* // *Координац. химия.* 2013. Т. 39, № 4. С. 223.
19. *Демин С.В., Жилов В.И., Нефедов С.Е., Баулин В.Е., Цивадзе А.Ю.* // *ЖНХ.* 2012. Т. 57, № 6. С. 970. [*Demin S.V., Nefedov S.E., Zhilov V.I. Baulin V.E., Tsvivadze A.Y.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2012. Vol. 57, N 6. P. 897–902. <https://doi.org/10.1134/S0036023612060095>]
20. *Shuvaev S., Kotova O., Utochnikova V., Vaschenko A., Puntus L., Baulin V., Kuzmina N., Tzivadze A.* // *Inorg. Chem. Comm.* 2012. Vol. 20. P. 73–76. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2012.02.020>
21. *Евреинов В.И., Сафронова З.В., Яркевич А.Н., Харитонов А.В., Бондаренко Н.А., Цветков Е.Н.* // *ЖОХ.* 1999. Т.69, № 7. С. 1088–1092. [*Evreinov V.I., Safronova Z.V., Yarkevich A.N., Kharitonov A.V., Bondarenko N.A., Tsvetkov E.N.* // *Russ. J. Gen. Chem.* 1999. Vol. 69, N 7. P. 1047].
22. *Розен А.М., Беркман З.А., Бертина Л.Э., Денисов Д.А., Зарубин А.И., Косых В.Г., Николотова З.И., Писарева С.А., Юдина К.С.* // *Радиохимия.* 1976. Т. 18, № 4. С. 493.
23. *Туранов А.Н., Карандашев В.К., Федосеев А.М., Радыгина Н.И., Баулин В.Е.* // *Радиохимия.* 2005. Т. 47. № 2. С. 158.
24. *Цветков Е.Н., Евреинов В.И., Бондаренко Н.А., Сафронова З.В.* // *ЖОХ.* 1996. Т. 66, № 7. С. 1081.
25. *Розен А.М., Николотова З.И., Карташева Н.А.* // *ЖНХ.* 1979. Т. 24, № 6. С. 1642.
26. *Власов В.С., Розен А.М.* // *Радиохимия.* 1988. Т. 30, № 1. С. 146.