

ЭКСТРАКЦИЯ U(VI), Th(IV) И РЗЭ(III) ИЗ АЗОТНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ БИС [(ДИФЕНИЛФОСФОРИЛ)АЦЕТАМИДО]АЛКАНАМИ

© 2021 г. А. Н. Туранов^{а, *}, В. К. Карандашев^б, А. Н. Яркевич^в

^аИнститут физики твердого тела РАН,
142432, Черноголовка Московской обл., ул. Акад. Осипьяна, д. 2
^{*}e-mail: turanov@issp.ac.ru

^бИнститут проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН,
142432, Черноголовка Московской обл., ул. Акад. Осипьяна, д. 6

^вИнститут физиологически активных веществ РАН,
142432, Черноголовка Московской обл., Северный проезд, 1

Получена 23.12.2019, после доработки 10.03.2019, принята к публикации 17.03.2020

Установлено, что объединение в одной молекуле двух бидентатных фрагментов $\text{Ph}_2\text{P}(\text{O})\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{NAlk}$ – через амидный атом азота алкиленовым мостиком приводит к заметному увеличению экстракции U(VI), Th(IV) и РЗЭ(III) из азотнокислых растворов. 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.

Ключевые слова: экстракция, уран(VI), торий(IV), РЗЭ(III), карбамоилметилфосфиноксиды.

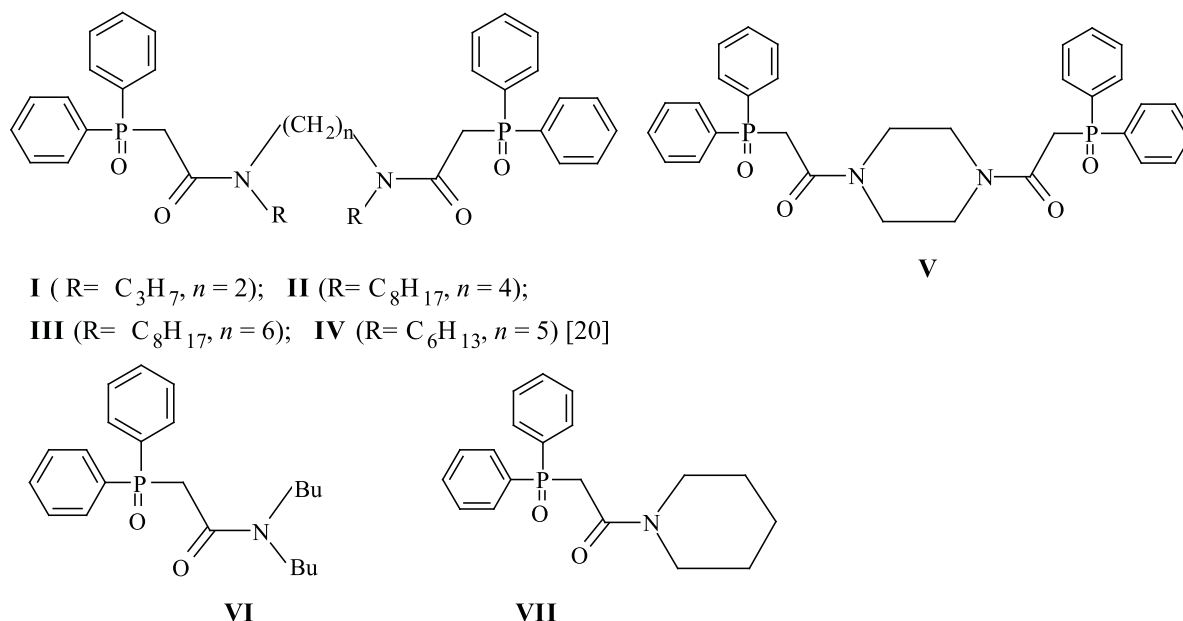
DOI: 10.31857/S0033831121040080

Бидентатные нейтральные фосфорорганические соединения, в частности, диарил(диалкилкарбамоилметил)фосфиноксиды (КМФО), обладают высокой экстракционной способностью по отношению к актинидам и редкоземельным элементам (РЗЭ) в азотнокислых средах и используются для извлечения и концентрирования этих элементов в экстракционных [1, 2] и сорбционных [3] системах. Влияние строения КМФО на их экстракционную способность и селективность изучено достаточно подробно [4–8].

В последнее время возрос интерес к использованию в экстракционной практике полифункциональных фосфорорганических реагентов [9–13]. Показано, что лиганды, полученные присоединением нескольких групп КМФО к пространственно предорганизованной структурной основе, обладают более высокой экстракционной способностью по отношению к ионам актиноидов и РЗЭ(III), чем сами КМФО [14].

Экстракционная способность соединений с двумя КМФО-фрагментами в значительной мере определяется характером соединения этих фрагментов в молекуле. Показано, что 1,7-бис(дибутилкарбамоил)-1,7-бис(дифенилфосфинил)гептан, молекула которого содержит две координирующие группы $\text{Ph}_2\text{P}(\text{O})\text{CHC}(\text{O})\text{NBu}_2$, соединенные через метиновые группы пентаметиленовой цепочкой, мало отличается по своей экстракционной способности по отношению к Am(III) [15] и РЗЭ(III) [16] в азотнокислых средах от КМФО $\text{Ph}_2\text{P}(\text{O})\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{NBu}_2$. С другой стороны, объединение в одной молекуле двух бидентатных фрагментов $\text{Ph}_2\text{P}(\text{O})\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{NH}$ – через амидный атом азота ди- или триэтиленгликолевой цепочкой [17], а также алкиленовым [18] или ариленовым мостиком [19] приводит к заметному увеличению экстракции U(VI), Th(IV) и РЗЭ(III) из азотнокислых растворов. Существенным недостатком таких реагентов является низкая растворимость в органических растворителях. Замена атома водорода в амидных группах таких реагентов на алкильные радикалы

Схема 1.



приводит к существенному увеличению растворимости соединения $Ph_2P(O)CH_2C(O)N(C_6H_{13}) \cdot (CH_2)_5N(C_6H_{13})C(O)CH_2P(O)Ph_2$ в органических растворителях [20]. Влияние длины алкиленового мостика между координирующими КМФО-фрагментами в молекуле экстрагента на его экстракционную способность до настоящего времени не рассматривалось.

Цель данной работы – исследовать влияние характера соединения КМФО-фрагментов (Схема 1) в молекуле экстрагента на эффективность экстракции РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) из азотнокислых растворов. Для этого рассмотрено межфазное распределение РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) между растворами HNO_3 и органической фазой, содержащей соединения **I–III**, отличающиеся длиной алкиленового мостика между координирующими фрагментами, а также соединение **V** с пиперазиновым фрагментом между фрагментами КМФО. Эффективность экстракции ионов металлов этими экстрагентами сопоставлена с эффективностью их экстракции монофосфорильными аналогами **VI** и **VII**, а также с литературными данными по экстракции ионов металлов соединением **IV** [20] в сопоставимых условиях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Соединения **I–III**, **V**, **VI** и **VII** получены известными методами [21, 22]. В качестве органического растворителя использовали 1,2-дихлорэтан, нитробензол и *o*-ксилол марки х.ч. без дополнительной очистки. Растворы экстрагентов в органических растворителях готовили по точным навескам.

Распределение РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) в экстракционных системах изучали на модельных растворах 0.3–7.0 моль/л HNO_3 . Исходные водные растворы с концентрацией каждого элемента 2×10^{-6} моль/л готовили растворением соответствующих нитратов в воде с последующим добавлением HNO_3 до требуемой концентрации. Используемые реактивы соответствовали марке х.ч.

Опыты по экстракции проводили в пробирках с притертыми пробками при температуре $21 \pm 1^\circ C$ и соотношении объемов органической и водной фаз 1 : 1. Контакт фаз осуществляли 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 (D).

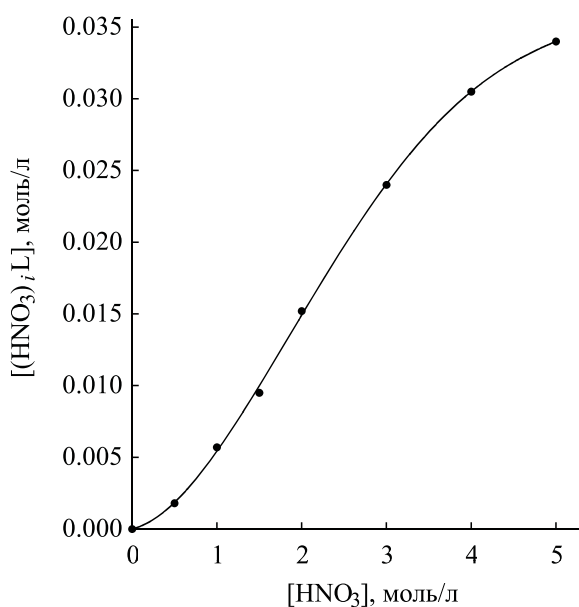


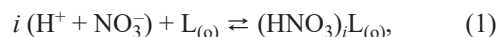
Рис. 1. Экстракция азотной кислоты растворами 0.01 моль/л соединения II в дихлорэтане.

Содержание РЗЭ(III), U(VI) и Th(IV) в исходных и равновесных водных растворах определяли методом масс-спектрометрии с ионизацией пробы в индуктивно связанной плазме с использованием масс-спектрометра X-7 (Thermo Electron, США) по ранее описанной методике [23]. Содержание элементов в органической фазе определяли после реэкстракции раствором 0.1 моль/л оксиэтилидендифосфоновой кислоты. Коэффициенты распределения элементов рассчитывали как отношение их концентраций в равновесных фазах. Погрешность определения коэффициентов распределения не превышала 5%. Концентрацию HNO₃ в равновесных водных фазах определяли потенциометрическим титрованием раствором NaOH. Концентрацию HNO₃ в равновесной органической фазе определяли таким же образом после реэкстракции HNO₃ водой. Параллельно определяли содержание HNO₃ в органической фазе при экстракции кислоты чистым дихлорэтаном (холостой опыт). Результаты холостого опыта учитывали при расче-

те общей концентрации комплексов HNO₃ с экстрагентом в органической фазе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поскольку экстракция ионов металлов из азотнокислых растворов нейтральными фосфорорганическими соединениями сопровождается взаимодействием HNO₃ с экстрагентом, предварительно исследована экстракция HNO₃ раствором соединения II. Данные по распределению HNO₃ между ее водными растворами и раствором соединения II в дихлорэтане (рис. 1) указывают на то, что при [HNO₃] > 4 моль/л отношение концентрации HNO₃, связанной в комплексы с экстрагентом, и исходной концентрации экстрагента в органической фазе превышает 3, т.е. в комплексообразовании с HNO₃ участвуют все группы Р=О и С=О молекулы экстрагента (L). Исходя из этого процесс экстракции HNO₃ может быть описан уравнениями



где символами (о) обозначены компоненты органической фазы, $i = 1, 2, 3$ и 4 – число молекул HNO₃ в экстрагируемом сольвате. Эффективные константы экстракции HNO₃ (K_1, K_2, K_3 и K_4) выражаются как

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

где a – активность HNO₃ 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, K_2, K_3 и K_4 , рассчитанные нелинейным методом наименьших квадратов с использованием уравнения

$$y/[\text{L}]_{(\text{исх})} = (K_1a + 2K_2a^2 + 3K_3a^3 + 4K_4a^4)/(1 + K_1a + K_2a^2 + K_3a^3 + K_4a^4). \quad (3)$$

(где y – общая концентрация комплексов HNO₃ с экстрагентом в органической фазе, $[\text{L}]_{(\text{исх})}$ – исходная концентрация экстрагента), приведены ниже. Для сравнения приведены значения K_1 и K_2 для КМФО VI.

Эффективные константы экстракции HNO₃ растворами соединений II и VI в дихлорэтане

Соединение	K_1	K_2	K_3	K_4
II	2.60 ± 0.09	0.43 ± 0.03	0.081 ± 0.006	0.0029 ± 0.0003
VI [8]	1.01	0.0339		

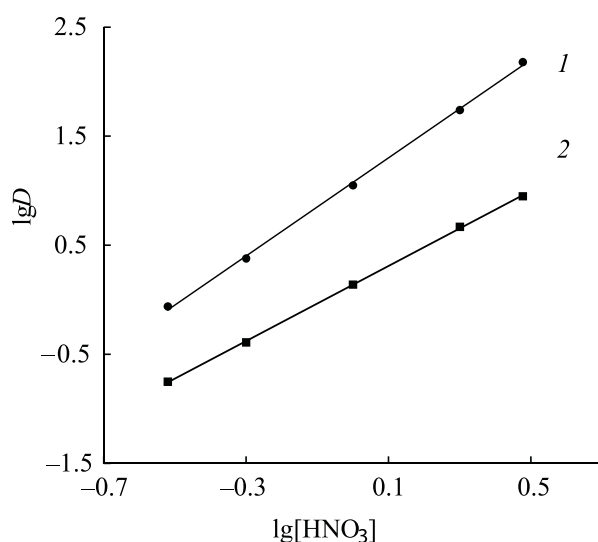


Рис. 2. Зависимость коэффициентов распределения Th (1) и U (2) от концентрации HNO_3 в водной фазе при экстракции растворами 0.001 моль/л соединения II в дихлорэтано.

Можно видеть, что соединение II обладает более высокой экстракционной способностью по отношению к HNO_3 по сравнению с КМФО VI, что связано с увеличением числа донорно-активных групп в его молекуле. Это приводит к более заметному снижению концентрации свободного экстрагента II в органической фазе, чем в системе с КМФО VI.

Рассмотрено влияние концентрации HNO_3 в равновесной водной фазе на изменение коэффициентов распределения U(VI) и Th(IV) при экстракции раствором соединения II в дихлорэтано (рис. 2). Увеличение концентрации HNO_3 сопровождается ростом D_U и D_{Th} , что соответствует экстракции этих ионов в виде координационно-сольватированных нитратов [1]. Аналогичный характер зависимостей D_U – $[\text{HNO}_3]$ отмечался при экстракции растворами КМФО VI [2]. Стехиометрическое соотношение металл : экстрагент в экстрагируемых комплексах определено методом сдвига равновесия. Полученные данные (рис. 3) показали, что бис-КМФО I–III экстрагируют U(VI) из азотнокислых растворов в основном в форме моносольватов (тангенс угла наклона зависимости $\lg D_U$ – $\lg [L]$ равен 1.0 ± 0.1). В аналогичных условиях бис-КМФО V, а также КМФО VII и VI [2] экстрагируют U(VI) в виде моно- и дисольватов. Th(IV) экстрагируется соединением II из раствора 3 моль/л HNO_3 в виде дис-

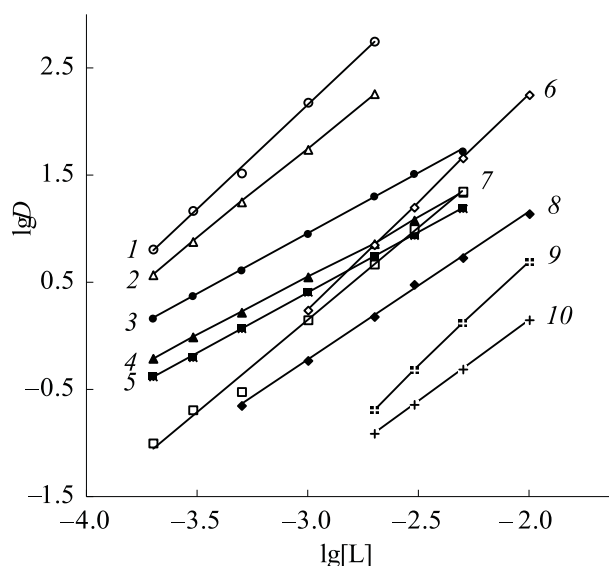


Рис. 3. Зависимость коэффициентов распределения Th (1, 2, 6, 7, 9) и U (3–5, 8, 10) от концентрации соединений I (5, 7), II (1, 3), III (2, 4), V (9, 10) и VII (6, 8) в дихлорэтано при экстракции из раствора 3 моль/л HNO_3 .

ольвата, а соединениями I и III – в форме моно- и дисольватов (тангенс угла наклона зависимости $\lg D_{Th}$ – $\lg [L]$ равен 1.68 ± 0.1). В таких же условиях бис-КМФО V, а также КМФО VII экстрагируют Th(IV) в виде дисольватов (рис. 3).

Для сравнения экстракционной способности соединений I–VII по отношению к U(VI) и Th(IV), а также фактора разделения тория и урана ($\beta_{Th/U} = D_{Th}/D_U$) в табл. 1 представлены данные по экстракции U(VI) и Th(IV) из азотнокислых растворов в сопоставимых условиях.

Можно видеть, что характер объединения координирующих фрагментов в молекуле экстрагентов I–V существенно влияет на эффективность экстрак-

Таблица 1. 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	$\lg D_{Th}$	$\lg D_U$	$\beta_{Th/U}$
I ($n = 2$)	0.67	0.74	0.85
II ($n = 4$)	2.75	1.30	28.2
IV ($n = 5$) [20]	2.75	1.18	37.1
III ($n = 6$)	2.26	0.86	25.1
V	–0.69	–0.91	1.7
VI [16]	1.70	0.32	24.0
VII	0.85	0.18	4.7

ции U(VI) и Th(IV). Экстракционная способность бис-КМФО V, в молекуле которого координирующие карбамоильные группы заблокированы жестким пиперазиновым фрагментом, значительно снижается по сравнению с его моно-аналогом VII. Зависимость D_U и D_{Th} от числа метиленовых групп (n) в алкиленовом мостике между двумя координирующими группами $Ph_2P(O)CH_2C(O)NAlk$ носит немонотонный характер. Вероятно, для эффективных экстрагентов II–IV некоторое влияние оказывают также стерические факторы, связанные с размером свободного алкильного радикала R при атоме азота. Максимальные значения D наблюдаются при $n = 4$ при экстракции U(VI) и $n = 4$ и 5 при экстракции Th(IV). Особенно заметно влияние уменьшения длины алкиленового мостика в молекуле соединения I проявляется при экстракции Th(IV), который экстрагируется соединением I даже хуже, чем его моно-аналог – КМФО VI. Это может быть связано как с наличием стерических препятствий для комплексообразования с участием

связанных через атом азота карбамоильных фрагментов, так и со снижением донорной способности координирующих групп экстрагента I вследствие действия индукционного эффекта. С увеличением n от 2 до 4 это действие ослабляется, и величина D_{Th} резко возрастает. Снижение D_U и D_{Th} при увеличении n от 5 до 6 может быть связано с увеличением расстояния между координирующими центрами молекулы экстрагента, что препятствует полидентатной координации с ионом металла.

Аналогичные зависимости эффективности экстракции РЗЭ(III) растворами соединений I–VII от их строения получены при сравнении значений D_{Ln} при экстракции из раствора 3 моль/л HNO_3 (рис. 4). Соединения I–IV экстрагируют РЗЭ(III) более эффективно, чем их моно-аналог VI. Одной из причин этого может быть участие дополнительной координирующей группы в комплексообразовании с ионами Ln^{3+} . Однако это предположение требует подтверждения путем проведения структурных исследований экстрагируемых комплексов. Наибольшие

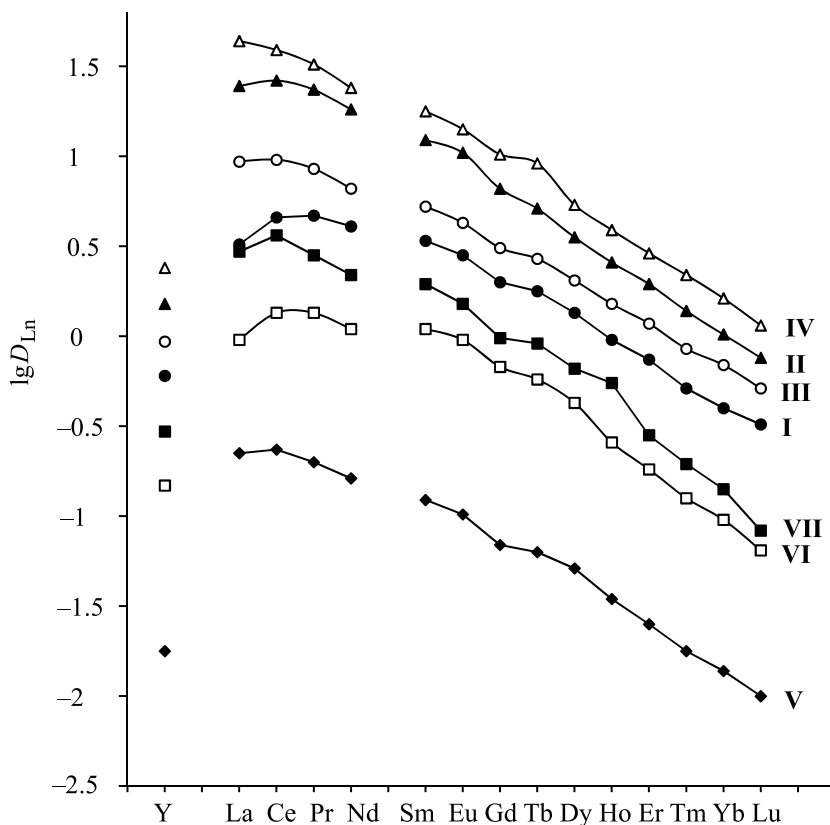


Рис. 4. Экстракция РЗЭ(III) и Y(III) растворами 0.025 моль/л соединений I–III, IV [20] и V, 0.05 моль/л соединений VI и VII в дихлорэтаноле из растворов 3 моль/л HNO_3 .

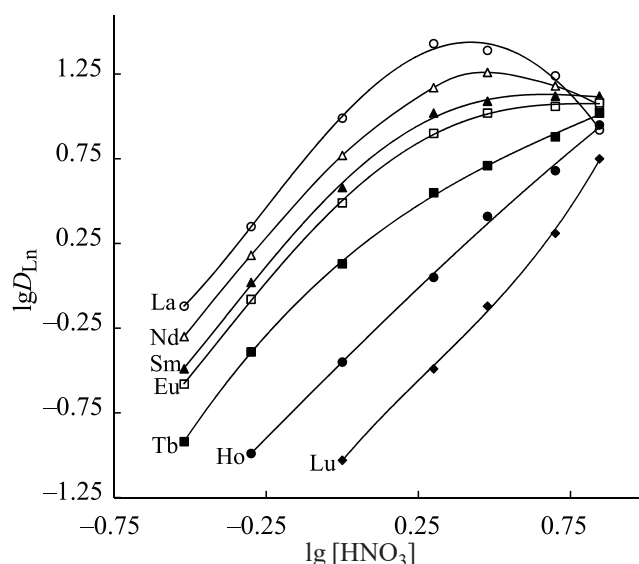


Рис. 5. Зависимость коэффициентов распределения РЗЭ(III) от концентрации HNO_3 в водной фазе при экстракции растворами 0.025 моль/л соединения II в дихлорэтано.

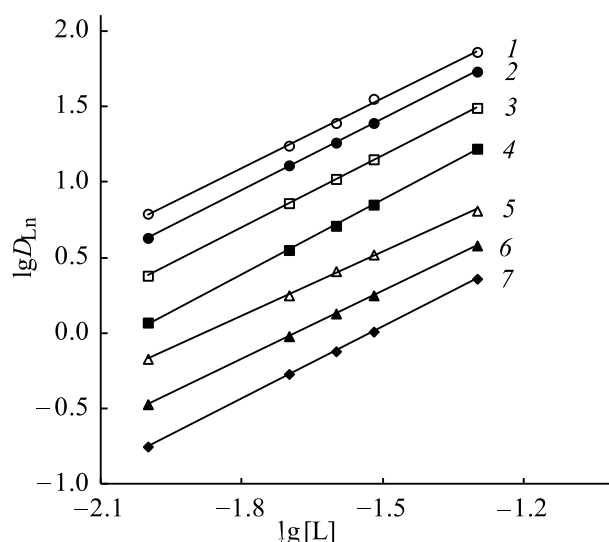


Рис. 6. Зависимость коэффициентов распределения РЗЭ(III) от концентрации соединения II в дихлорэтано при экстракции из раствора 3 моль/л HNO_3 .

значения D_{Ln} наблюдаются при экстракции соединением IV (рис. 4). Экстракционная способность бис-КМФО V значительно снижается по сравнению с его моно-аналогом VII.

При экстракции соединениями I–VII в области умеренной концентрации HNO_3 наблюдается тенденция уменьшения D_{Ln} с увеличением атомного номера (Z) РЗЭ (рис. 4). Такой же характер зависимости $D_{\text{Ln}}-Z$ отмечался ранее при экстракции РЗЭ(III) растворами КМФО [6, 24, 25] и был объяснен увеличением энергии гидратации ионов Ln^{3+} вследствие уменьшения их ионных радиусов с возрастанием Z [6].

При изучении влияния концентрации HNO_3 в водной фазе на экстракцию РЗЭ(III) раствором соединения II в дихлорэтано получена зависимость $D_{\text{Ln}}-[\text{HNO}_3]$ с максимумом для легких РЗЭ(III) (рис. 5). Такая зависимость соответствует экстракции координационно-сольватированных нитратов РЗЭ(III) и связана 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 на кривой зависимости $D_{\text{Ln}}-[\text{HNO}_3]$ смещается в область большей кислотности водной фазы по мере увеличения Z от La(III) к Sm(III). При экстрак-

ции Tb(III)–Lu(III) наблюдается увеличение D_{Ln} во всем исследованном интервале концентрации HNO_3 (рис. 5). Аналогичный характер зависимостей $D_{\text{Ln}}-[\text{HNO}_3]$ отмечался при экстракции РЗЭ(III) растворами КМФО [6, 24, 25].

Таблица 2. Эффективные константы экстракции РЗЭ(III), K_1^{Ln} и K_2^{Ln} , из азотнокислых растворов растворами соединения II и КМФО VI в дихлорэтано

РЗЭ(III)	$\lg K_1^{\text{Ln}}(\text{II})$	$\lg K_2^{\text{Ln}}(\text{II})$	$\lg K_2^{\text{Ln}}(\text{VI})$ [25]
La	5.13 ± 0.05	7.07 ± 0.05	5.22
Ce	5.16 ± 0.05	7.09 ± 0.05	5.38
Pr	5.05 ± 0.05	6.97 ± 0.05	5.39
Nd	4.93 ± 0.05	6.85 ± 0.05	5.26
Sm	4.77 ± 0.06	6.64 ± 0.06	5.19
Eu	4.62 ± 0.05	6.54 ± 0.05	5.15
Gd	4.28 ± 0.06	6.22 ± 0.06	4.95
Tb	4.18 ± 0.05	6.12 ± 0.05	4.75
Dy	3.93 ± 0.06	5.87 ± 0.06	4.60
Ho	3.67 ± 0.05	5.56 ± 0.05	4.22
Er	3.47 ± 0.06	5.27 ± 0.06	3.95
Tm	3.33 ± 0.05	5.17 ± 0.05	3.85
Yb	3.12 ± 0.06	5.01 ± 0.06	3.75
Lu	2.85 ± 0.05	4.75 ± 0.05	3.55

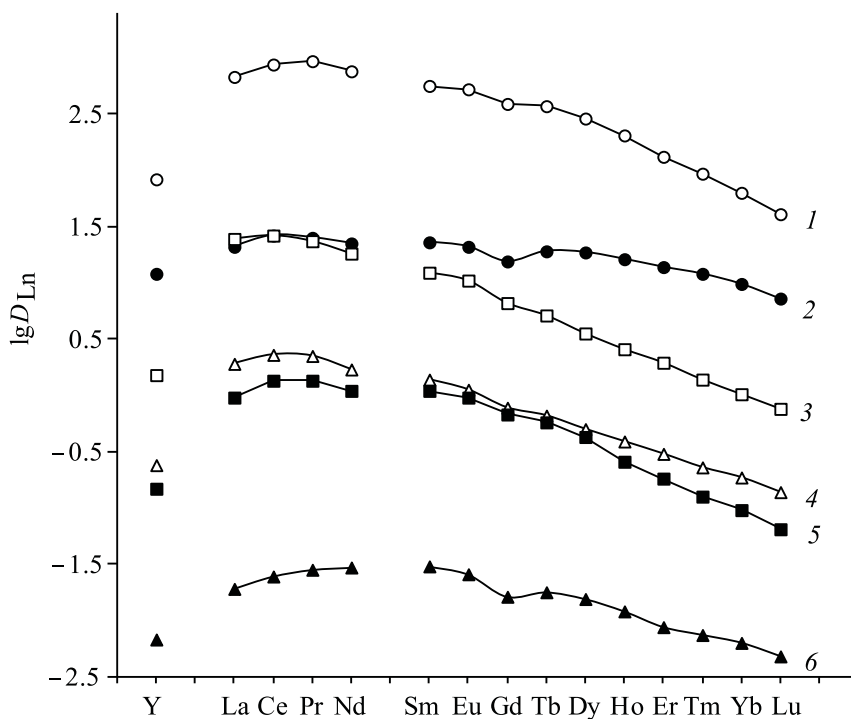
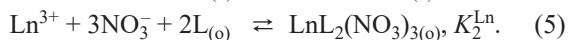


Рис. 7. Экстракция РЗЭ(III) и Y(III) растворами 0.025 моль/л соединения II (1, 3, 4) и 0.05 моль/л соединения VI (2, 5, 6) в нитробензоле (1, 2), дихлорэтано (3, 5) и *o*-ксилоле (4, 6) из растворов 3 моль/л HNO₃.

Стехиометрическое соотношение Lu(III) : экстрагент в экстрагируемых комплексах определено методом сдвига равновесия. Полученные данные (рис. 6) показали, что соединение II в дихлорэтано экстрагирует РЗЭ(III) из азотнокислых растворов в форме моно- и дисольватов. В аналогичных условиях КМФО экстрагируют РЗЭ(III) в форме ди- и трисольватов [24, 25].

Процесс экстракции ионов РЗЭ(III) из растворов HNO₃ умеренной концентрации соединением II может быть описан уравнениями



Эффективные константы экстракции РЗЭ(III) (K_1^{Ln} и K_2^{Ln}) из растворов 0.3–2 моль/л HNO₃, рассчитанные нелинейным методом наименьших квадратов с использованием уравнения

$$D_{\text{Ln}} = [\text{NO}_3^-]^3 \gamma_{\pm}^4 (K_1^{\text{Ln}} [\text{L}]_0 f^{-1} + K_2^{\text{Ln}} [\text{L}]_0^2 f^{-2}), \quad (6)$$

где $\gamma_{\pm}$ – коэффициент активности соответствующего нитрата РЗЭ(III) [26], f – поправка на связывание экстрагента азотной кислотой ($f = 1 + K_1 a + K_2 a^2 + K_3 a^3 + K_4 a^4$), представлены в

табл. 2. Там же для сравнения приведены значения K_2^{Ln} для КМФО VI. Можно видеть, что по своей экстракционной способности по отношению к РЗЭ(III) соединение II превосходит КМФО VI.

Природа органического растворителя существенно влияет на эффективность экстракции РЗЭ(III) соединением II из азотнокислых растворов. Значения D_{Ln} возрастают в ряду *o*-ксилол < дихлорэтан < нитробензол (рис. 7) по мере увеличения их полярности и сольватирующей способности, что наблюдалось и при экстракции РЗЭ(III) и Am(III) растворами КМФО [27, 28].

Представленные данные показали, что объединение в одной молекуле двух бидентатных фрагментов Ph₂P(O)CH₂C(O)NAlk– через амидный атом азота алкиленовым мостиком приводит к заметному увеличению экстракции U(VI), Th(IV) и РЗЭ(III) из азотнокислых растворов. Экстракционная способность бис-КМФО V, в молекуле которого координирующие группы соединены жестким пиперазиновым фрагментом, значительно снижается по сравнению с его моно-аналогом VII. Зависимость D_{U} , D_{Th} и D_{Ln} от числа метиленовых групп (n) в алкиленовом мостике между двумя ко-

ординирующими группами $\text{Ph}_2\text{P}(\text{O})\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{N}(\text{R})$ носит немонотонный характер и может зависеть также от природы алкильного заместителя R. Максимальные значения D наблюдаются при $n = 4$ при экстракции U(VI) и $n = 5$ при экстракции РЗЭ(III).

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках Государственного задания 2019 г. ИФТТ РАН, ИПТМ РАН и ИФАВ РАН (тема 090-2019-0008).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розен А.М., Крупнов Б.В. // Успехи химии. 1996. Т. 65, № 11. С. 1052–1079.
2. Чмутова М.К., Литвина М.Н., Прибылова Г.А. и др. // Радиохимия. 1999. Т. 41, № 4. С. 331–335.
3. Мясоедова Г.В. // Рос. хим. журн. 2005. Т. 49, № 2. С. 72–75.
4. Медведь Т.Я., Чмутова М.К., Нестерова Н.П. и др. // Изв. АН СССР. Сер. хим. 1981. № 9. С. 2121–2127.
5. Myasoedov B.F., Chmutova M.K., Kochetkova N.E. et al. // Solvent Extr. Ion Exch. 1986. Vol. 4, N 1. P. 61–81.
6. Horwitz E.P., Martin K.A., Diamond H., Kaplan L. // Solvent Extr. Ion Exch. 1986. Vol. 4, N 3 P. 449–494.
7. Чмутова М.К., Иванова Л.А., Кочеткова Н.Е. и др. // Радиохимия. 1995. Т. 37, № 5. С. 422–426.
8. Чмутова М.К., Литвина М.Н., Прибылова Г.А. и др. // Радиохимия. 1995. Т. 37, № 5. С. 430–435.
9. Leoncini A., Huskens J., Verboom W. // Chem. Soc. Rev. 2017. Vol. 46. P. 7229–7273.
10. Wilson A.M., Bailey P.J., Tasker P.A. // Chem. Soc. Rev. 2014. Vol. 43. P. 123–134.
11. Werner E.J., Biros S.M. // Org. Chem. Front. 2019. Vol. 6. P. 2067–2094.
12. Аляпышев М.Ю., Бабаин В.А., Устынюк Ю.А. // Успехи химии. 2016. Т. 85, № 9. С. 943–961.
13. Мاستрюкова Т.А., Артюшин О.И., Одинец И.Л., Тананаев И.Г. // Рос. хим. журн. 2005. Т. 49, № 2. С. 86–96.
14. Arnand-New F., Bohmer V., Dozol J.F. et al. // J. Chem. Soc. Perkin Trans. 2. 1996. P. 1175–1182.
15. Кочеткова Н.Е., Койро О.Э., Нестерова Н.П. и др. // Радиохимия. 1986. Т. 28, № 3. С. 338–345.
16. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Яркевич А.Н. // Радиохимия. 2012. Т. 54, № 5. С. 439–444.
17. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Бондаренко Н.А. // Радиохимия. 2006. Т. 48, № 2. С. 158–163.
18. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Шарова Е.В. и др. // Радиохимия. 2010. Т. 52, № 3. С. 219–223.
19. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Шарова Е.В. и др. // Радиохимия. 2012. Т. 54, № 1. С. 47–52.
20. Turanov A.N., Karandashev V.K., Sharova E.V. et al. // Solvent Extr. Ion Exch. 2012. Vol. 30. P. 604–622.
21. Яркевич А.Н., Брель В.К., Махаева Г.Ф. и др. // ЖОХ. 2015. Т. 85, № 7. С. 1120–1125.
22. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Харитонов А.В. и др. // ЖОХ. 1999. Т. 69, № 7. С. 1109–1115.
23. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Баулин В.Е., Цветков Е.Н. // ЖНХ. 1995. Т. 40, № 11. С. 1926–1930.
24. Литвина М.Н., Чмутова М.К., Мясоедов Б.Ф., Кабачник М.И. // Радиохимия. 1996. Т. 38, № 6. С. 525–530.
25. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Шарова Е.В. и др. // Цветные металлы. 2012. № 3. С. 51–55.
26. Власов В.С., Розен А.М. // Радиохимия. 1988. Т. 30, № 1. С. 146–147.
27. Розен А.М., Никифоров А.С., Николотова З.И., Карташева Н.А. // ДАН СССР. 1986. Т. 286, № 3. С. 667–670.
28. Шадрин А.Ю., Бабаин В.А., Киселева Р.Н. // Радиохимия. 1993. Т. 35, № 1. С. 45–50.