

УДК 542.61:546.442

## СИНТЕЗ И ЭКСТРАКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА 2-(3,4-ДИФЕНИЛФОСФИНИЛПИРРОЛИДИН- 1-ИЛ)ЭТАНОЛА И 3-(3,4-ДИФЕНИЛФОСФИНИЛ- ПИРРОЛИДИН-1-ИЛ)ПРОПАНОЛА

© 2022 г. А. Н. Туранов<sup>а</sup>, В. К. Карандашев<sup>б</sup>, В. К. Брель<sup>с,\*</sup>

<sup>а</sup> Институт физики твердого тела имени Ю. А. Осипьяна Российской академии наук, Черноголовка, 142432 Россия

<sup>б</sup> Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук,  
Черноголовка, 142432 Россия

<sup>с</sup> Институт элементоорганических соединений имени А. Н. Несмеянова Российской академии наук,  
ул. Вавилова 28, Москва, 119334 Россия

\* e-mail: v\_brel@mail.ru

Поступило в редакцию 21 сентября 2022 г.

После доработки 21 сентября 2022 г.

Принято к печати 6 октября 2022 г.

Разработан метод синтеза 2-(3,4-дифенилфосфинилпирролидин-1-ил)этанола и 3-(3,4-дифенилфосфинилпирролидин-1-ил)пропанола и изучена экстракция U(VI), Th(IV) и лантанидов(III) из азотнокислых растворов. Определена стехиометрия извлекаемых комплексов, рассмотрено влияние строения экстрагента и концентрации HNO<sub>3</sub> в водной фазе на эффективность извлечения ионов металлов в органическую фазу. Установлено, что 2-(3,4-дифенилфосфинилпирролидин-1-ил)этанол обладает высокой экстракционной способностью по отношению к актинидам и лантанидам в нитратных средах.

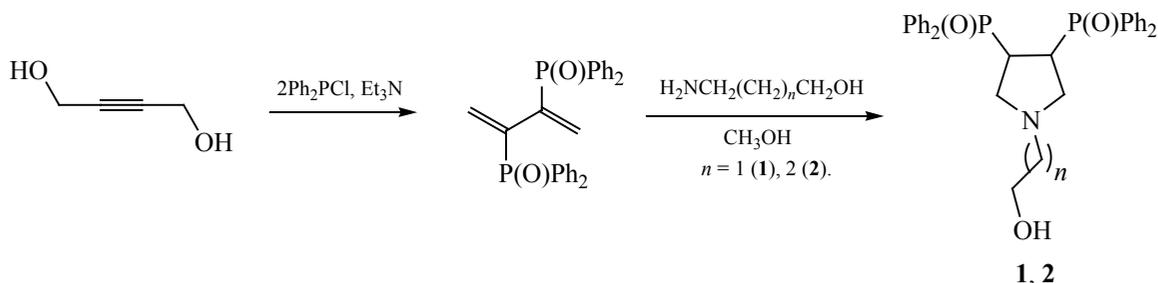
**Ключевые слова:** экстракция, уран(VI), торий(IV), лантаниды(III), фосфиноксиды

**DOI:** 10.31857/S0044460X22120137, **EDN:** MVQSHE

Для разделения и концентрирования лантанидов и актинидов при переработке отработанного ядерного топлива, широко применяются экстракционные технологии [1]. В связи с высокой экстракционной способностью фосфорорганических реагентов по отношению к актинидам и лантанидам, данные соединения могут рассматриваться в качестве перспективных экстрагентов. Наиболее высокой экстракционной способностью при извлечении актинидов и лантанидов из азотнокислых сред обладают полифункциональные бисфосфиноксиды [2–7]. При этом было установлено, что природа и строение углеродного мостика, который связывает два фосфиноксидных фрагмента, ока-

зывают решающее влияние на экстракционные свойства используемого бисфосфиноксида [7–9]. Например, этилендифосфиноксиды экстрагируют актиниды и лантаниды из азотнокислых растворов значительно менее эффективно, чем их аналоги с метиленовым мостиком между фосфиноксидными группами [7]. Замена фенильных радикалов при одном или двух атомах фосфора в молекуле 1,2-дифенилфосфинилэтана на алкильные заместители, приводит к увеличению экстракционной способности по отношению к U(VI), Th(IV) и Ln(III) [9–12], т. е. при экстракции этими соединениями не проявляется эффект «аномального арильного упрочнения» экстрагируемых комплексов [8].

Схема 1.



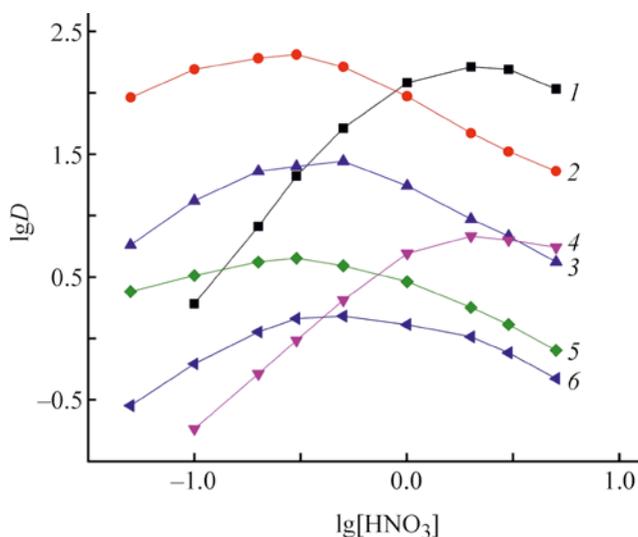
Введение алкильных [10–12] или винильных [13] групп в углеродный мостик молекулы 1,2-дифенилфосфинилэтана, сопровождается увеличением экстракционных свойств U(VI), Th(IV) и Ln(III). При замене этиленового мостика на фрагмент –CH=CH– [14, 15] или *o*-фениленовую группу [16] происходит заметное повышение коэффициентов распределения актинидов и лантанидов при их экстракции из азотнокислых растворов. Высокой экстракционной способностью обладают ароматические производные бисфосфиноксидов [17–19]. В последнее время появились данные, что бисфосфиноксиды полученные на основе азот содержащих гетероциклов, также демонстрируют высокие экстракционные свойства [19–23], поэтому представлялось интересным синтезировать новые гетероциклические бисфосфиноксиды и исследовать их экстракционные свойства.

Цель данной работы – синтез новых бисфосфиноксидов на платформе пирролидина и оценить их экстракционные свойства при извлечении актинидов и лантанидов из азотнокислых растворов. Для этого впервые были синтезированы 2-(3,4-дифенилфосфинилпирролидин-1-ил)этанол **1** и 3-(3,4-дифенилфосфинилпирролидин-1-ил)пропанол **2** и изучено межфазное распределение U(VI), Th(IV) и Ln(III) между растворами HNO<sub>3</sub> и органической фазой, содержащей соединения **1** и **2**. Эффективность экстракции ионов металлов фосфиноксидами **1** и **2** представлены в сравнении с данными по экстракции ионов металлов с использованием 1,2-бис(дифенилфосфинид)этана **3** в аналогичных условиях.

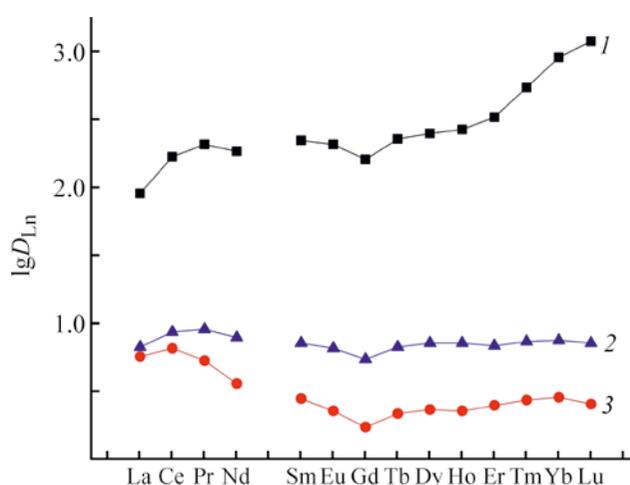
Синтез фосфорилированных пирролидинов представлен на схеме 1. В качестве исходного ре-

агента был использован 2,3-бис(дифенилфосфинил)бута-1,3-диен, который ранее был применен нами в качестве эффективного лиганда для получения комплексов, обладающих люминисцентными свойствами [24, 25]. 2,3-Бис(дифенилфосфинил)бута-1,3-диен был получен по ранее описанной методике [26]. Синтез на его основе ранее не описанных фосфорилированных пирролидинов **1** и **2** осуществлен при взаимодействии аминоканолов с 2,3-бис(дифенилфосфинил)бута-1,3-диеном. Реакцию проводили в кипящем метаноле в течение 12 ч. Контроль за протеканием реакции проводили с использованием тонкослойной хроматографии. После завершения реакции растворитель отгоняли, остаток хроматографировали на силикагеле с использованием в качестве элюента смеси CHCl<sub>3</sub>–CH<sub>3</sub>OH (100:4). Выход соединений **1** и **2** составил 78 и 80% соответственно. Строение соединений **1** и **2** установлено с использованием спектроскопии ЯМР <sup>1</sup>H, <sup>13</sup>C и <sup>31</sup>P, состав подтвержден с помощью элементного анализа.

На следующем этапе нами были исследованы экстракционные свойства полученных фосфорилированных пирролидинов **1** и **2**. Было изучено влияние концентрации HNO<sub>3</sub> в равновесной водной фазе на изменение коэффициентов распределения U(VI) и Th(IV) при экстракции растворами соединений **1–3** в дихлорэтаноле (рис. 1). Наблюдаемая при этом зависимость *D*–[HNO<sub>3</sub>] с максимумом соответствует экстракции координационно-сольватированных нитратов U(VI) и Th(IV) и, вероятно, связана с высаливающим действием ионов NO<sub>3</sub><sup>–</sup> и связыванием экстрагента азотной кислотой. Положение максимума на кривой зависимости *D*–[HNO<sub>3</sub>] при экстракции с ис-



**Рис. 1.** Зависимость коэффициентов распределения Th(IV) (1, 2, 5) и U(VI) (3, 4, 6) от концентрации  $\text{HNO}_3$  в водной фазе при экстракции растворами 0.005 моль/л соединений 1 (2, 3), 2 (5, 6) и 3 (1, 4) в дихлорэтане.



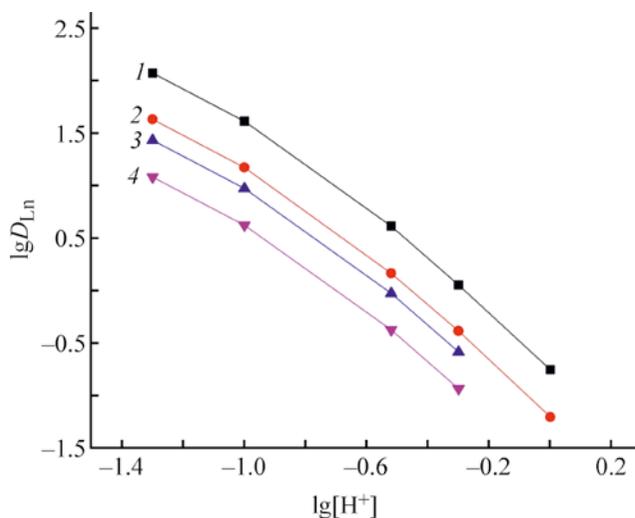
**Рис. 2.** Коэффициенты распределения Ln(III) при экстракции растворами 0.03 моль/л соединений 1–3 (1–3) в дихлорэтане из растворов 3 моль/л  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ .

пользованием фосфорилированных пирролидинов **1** и **2** смещается в область меньшей кислотности водной фазы при экстракции по сравнению с диоксидом **3**. Данный факт связан с более высокой способностью соединений **1** и **2** экстрагировать  $\text{HNO}_3$  вследствие наличия в их молекулах атома азота. В области низкой концентрации  $\text{HNO}_3$  соединение **1** экстрагирует U(VI) и Th(IV) значительно более эффективно, чем диоксид **3**. С ростом концентрации  $\text{HNO}_3$  различие в величинах  $D_{\text{Th}}$  и  $D_{\text{U}}$  для соединений **1** и **3** снижается, и при  $[\text{HNO}_3] > 3$  моль/л диоксид **3** экстрагирует U(VI) и Th(IV) более эффективно, чем соединение **1** (рис. 1). Во всем исследованном интервале концентрации  $\text{HNO}_3$  соединение **2** экстрагирует U(VI) и Th(IV) значительно менее эффективно, чем соединение **1**.

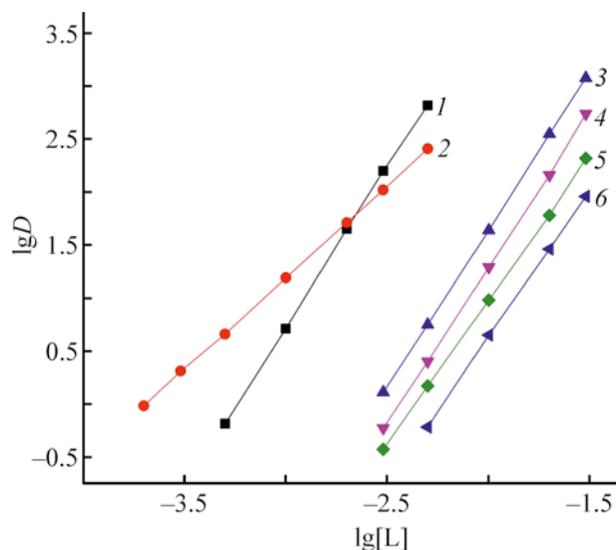
Для сравнения экстракционной способности соединений **1–3** по отношению к ионам Ln(III) и чтобы исключить влияние соэкстракции азотной кислоты, были получены данные по экстракции Ln(III) из раствора нитрата аммония (рис. 2). В условиях этого эксперимента наибольшей экстракционной способностью в отношении к Ln(III) обладает соединение **1**, которое экстрагирует ионы Ln(III) значительно лучше, чем диоксид **3**. При

этом различие в величинах  $D_{\text{Ln}}$  для соединений **1** и **3** возрастает в ряду Ln(III) от 13.5 для La(III) до 155 для Lu(III). Кроме того, соединение **1** проявляет более высокую селективность при экстракции ионов лантаноидов. Так, при экстракции соединением **1** величина коэффициента разделения Lu(III) и La(III),  $\beta_{\text{Lu/La}} = D_{\text{Lu}}/D_{\text{La}}$ , составляет 13.2, тогда как для соединения **3**  $\beta_{\text{Lu/La}} = 1.07$ . Кроме того, при экстракции ионов Ln(III) соединением **1** наблюдается тенденция увеличения  $D_{\text{Ln}}$  с увеличением атомного номера элемента ( $Z$ ), что связано с увеличением устойчивости комплексов Ln(III) с жесткими (по Пирсону) лигандами по мере увеличения плотности заряда ионов  $\text{Ln}^{3+}$  с увеличением  $Z$  [27]. В сопоставимых условиях соединение **2** экстрагирует Ln(III) менее эффективно, чем соединения **1** и **3** (рис. 2).

При постоянной концентрации ионов  $\text{NO}_3^-$  в водной фазе увеличение концентрации ионов  $\text{H}^+$  сопровождается снижением  $D_{\text{Ln}}$  (рис. 3), что связано со связыванием экстрагента азотной кислотой, приводящим к снижению концентрации свободного экстрагента **1** в органической фазе. Стехиометрическое соотношение металл–лиганд **1** в экстрагируемых комплексах определено методом сдвига равновесия. Полученные данные (рис. 4) пока-



**Рис. 3.** Зависимость коэффициентов распределения Yb(III) (1), Er(III) (2), Eu(III) (3) и La(III) (4) от концентрации ионов  $H^+$  в равновесной водной фазе при экстракции растворами 0.025 моль/л соединения **1** в дихлорэтане.  $[NO_3^-] = 3$  моль/л.



**Рис. 4.** Зависимость коэффициентов распределения Th(IV) (1), U(VI) (2), Lu(III) (3), Tm(III) (4), Eu(III) (5) и La(III) (6) от концентрации соединения **1** в дихлорэтане при экстракции из растворов 3 моль/л  $NH_4NO_3$ .

ли, что соединение **1** в дихлорэтане экстрагирует Ln(III) и Th(IV) из нитратных растворов в форме трисольватов, а U(VI) в виде моно- и дисольватов.

Представленные данные показали, что 2-(3,4-дифенилфосфорилпирролидин-1-ил)этанол, в молекуле которого дифенилфосфинильные группы соединены между собой посредством пирролидинового гетероцикла, обладает в слабых кислотных нитратных средах более высокой экстракционной способностью и селективностью по отношению к актинидам и лантанидам, и является более эффективным экстрагентом, чем стандартный экстрагент – 1,2-бис(дифенилфосфинил)этан, в молекуле которого дифенилфосфинильные группы соединены этиленовым спейсером.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Органические растворители марки ХЧ обезвоживали и очищали по стандартным методикам. Дейтерированный растворитель  $CDCl_3$  (Acros) использовали без дополнительной очистки. Синтез соединения **3** осуществлен по ранее описанной методике [28].

Спектры ЯМР  $^1H$ ,  $^{13}C\{^1H\}$  и  $^{31}P\{^1H\}$  растворов в  $CDCl_3$  регистрировали на приборе Bruker

Avance 400 при использовании сигнала остаточных протонов дейтерированного растворителя в качестве внутреннего эталона ( $^1H$ ,  $^{13}C$ ). Значения химических сдвигов в спектрах ЯМР  $^{31}P$  получены относительно внешнего стандарта (85%-ная  $H_3PO_4$ ). Рабочие частоты для спектров ЯМР  $^1H$ ,  $^{13}C$  и  $^{31}P$  составляли 400.13, 100.61 и 161.98 МГц соответственно. Спектры ЯМР  $^{13}C$  регистрировали в режиме JMODECHO, сигналы атомов углерода с четным и нечетным числом протонов имеют противоположную полярность. Контроль за протеканием реакций осуществляли методом ТСХ на пластинах Alumina TLC Plates w/UV254. Хроматографическую очистку веществ проводили на силикагеле Macherey-Nagel (MN Kieselgel 60, 70–230 меш).

**2-(3,4-Дифенилфосфинилпирролидин-1-ил)этанол (1).** К раствору 0.84 г (0.002 моль) 2,3-бис(дифенилфосфинил)бута-1,3-диена в 10 мл метанола прибавляли 0.09 г (0.002 моль) 2-аминоэтанола в 1 мл метанола. Реакционную массу перемешивали в кипящем метаноле 12 ч. Растворитель удаляли, остаток хроматографировали на силикагеле с использованием в качестве элюента смеси  $CHCl_3-CH_3OH$  (100:4). Выход 0.73 г (78%), белое

аморфное вещество, т. пл. 98°C. Спектр ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $\delta$ , м. д. ( $J$ , Гц): 2.53–2.67 м (2H,  $\text{NCH}_2$ ), 2.78–2.88 м (2H,  $\text{CHNCHP}$ ), 3.03–3.14 м (2H,  $\text{CHP}$ ), 3.35–3.45 м (2H,  $\text{CHNCHP}$ ), 3.56–3.64 м (2H,  $\text{CH}_2\text{OH}$ ), 3.89 уш. с (1H, OH), 7.19–7.74 м (20H,  $\text{C}_6\text{H}_5$ ). Спектр ЯМР  $^{13}\text{C}\{^1\text{H}\}$ ,  $\delta_{\text{C}}$ , м. д.: 36.47 д ( $\text{CHP}$ ,  $J_{\text{CP}}$  98.7 Гц), 53.80 ( $2\text{CH}_2\text{N}$ ), 55.05 ( $\text{CH}_2\text{N}$ ), 59.19 ( $\text{CH}_2\text{OH}$ ), 128.62 д ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{P}$ ,  $J_{\text{PCпара}}$  16.7 Гц), 130.69 д ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{P}$ ,  $J_{\text{PCмета}}$  20.5 Гц), 131.61 д ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{P}$ ,  $J_{\text{PCорто}}$  28.0 Гц), 132.32 д ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{P}$ ,  $J_{\text{PCинсо}}$  94.0 Гц). Спектр ЯМР  $^{31}\text{P}\{^1\text{H}\}$ :  $\delta_{\text{P}}$  34.9 м. д. Найдено, %: С 76.81; Н 6.69; N 2.84; P 6.69.  $\text{C}_{30}\text{H}_{31}\text{NPO}_2$ . Вычислено, %: С 76.90; Н 6.67; N 2.99; P 6.61.

**3-(3,4-Дифенилфосфинилпирролидин-1-ил)-пропанол (2)** получали аналогично с использованием 2,3-бис(дифенилфосфинил)бута-1,3-диена (0.84 г, 0.002 моль) и 3-аминопропанола (0.12 г, 0.002 моль). Выход 0.77 г (80%), белое аморфное вещество, т. пл. 81°C. Спектр ЯМР  $^1\text{H}$ ,  $\delta$ , м. д. ( $J$ , Гц): 1.39–1.41 м (1H,  $\text{CHNCH}_2\text{OH}$ ), 1.56–1.61 м (1H,  $\text{CHNCH}_2\text{OH}$ ), 2.50–2.53 м (2H,  $\text{NCH}_2$ ), 2.70–2.89 м (2H,  $\text{CHNCHP}$ ), 3.07–3.10 м (2H,  $\text{CHP}$ ), 3.34–3.53 м (2H,  $\text{CHNCHP}$ ), 3.52–3.64 м (2H,  $\text{CH}_2\text{OH}$ ), 4.50 уш. с (1H, OH), 7.05–7.71 м (20H,  $\text{C}_6\text{H}_5$ ). Спектр ЯМР  $^{13}\text{C}\{^1\text{H}\}$ ,  $\delta_{\text{C}}$ , м. д.: 30.10 ( $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ ), 36.03 д ( $\text{CHP}$ ,  $J_{\text{CP}}$  98.7 Гц), 54.72 ( $\text{CH}_2\text{N}$ ), 55.09 ( $2\text{CH}_2\text{N}$ ), 63.03 ( $\text{CH}_2\text{OH}$ ), 126.02 д ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{P}$ ,  $J_{\text{PCпара}}$  16.0 Гц), 130.32 д ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{P}$ ,  $J_{\text{PCмета}}$  21.0 Гц), 131.32 д ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{P}$ ,  $J_{\text{PCорто}}$  28.0 Гц), 132.66 д ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{P}$ ,  $J_{\text{PCинсо}}$  94.0 Гц). Спектр ЯМР  $^{31}\text{P}\{^1\text{H}\}$ :  $\delta_{\text{P}}$  32.88 м. д. Найдено, %: С 76.23; Н 6.80; N 2.93; P 6.54.  $\text{C}_{31}\text{H}_{33}\text{NPO}_2$ . Вычислено, %: С 77.16; Н 6.89; N 2.90; P 6.42.

**Исследование экстракционных свойств.** Распределение Ln(III), U(VI) и Th(IV) в экстракционных системах изучали на модельных растворах 0.3–5.0 моль/л  $\text{HNO}_3$ . Исходные водные растворы с концентрацией каждого элемента  $4 \times 10^{-6}$  моль/л готовили растворением соответствующих нитратов в воде с последующим добавлением  $\text{HNO}_3$  до требуемой концентрации. Все Ln(III) (кроме Pm) присутствовали в исходных водных растворах. Используемые реактивы соответствовали марке ХЧ. Опыты по экстракции проводили в пробирках с притертыми пробками при температуре  $21 \pm 1^\circ\text{C}$  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 ( $D$ ).

Содержание Ln(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 XSeries II (Thermo Scientific, США). Содержание элементов в органической фазе определяли по разнице концентраций в водном растворе до и после экстракции. Коэффициенты распределения элементов рассчитывали, как отношение их концентраций в равновесных фазах. Погрешность определения коэффициентов распределения не превышала 10%. Концентрацию  $\text{HNO}_3$  в равновесных водных фазах определяли потенциометрическим титрованием раствором NaOH.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Карандашев Василий Константинович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0684-272X>

Брель Валерий Кузьмич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4645-3251>

#### ФИНАНСОВАЯ 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 и Института элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН на 2022 г. Синтез исследуемых соединений выполнен при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 20-13-00329). Регистрация спектров ЯМР проведена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации с использованием научного оборудования Центра исследования строения молекул Института элементоорганических соединений РАН.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

В.К. Брель является членом редколлегии Журнала общей химии. Остальные авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Myasoedov B.F., Kalmykov S.N., Kulyako Yu.M., Vinokurov S.E.* // *Geochem. Int.* 2016. Vol. 54. N 13. P. 1156. doi 10.1134/S0016702916130115
2. *Аляпишев М.Ю., Бабаин В.А., Устынюк Ю.А.* // *Успе. хим.* 2016. Т. 85. № 9. С. 943; *Алуарусhev М.Ю., Babain V.A., Ustyunuk Yu.A.* // *Russ. Chem. Rev.* 2016. Vol. 85. N 9. P. 943. doi 10.1070/RCR4588
3. *Leoncini A., Huskens J., Verboom W.* // *Chem. Soc. Rev.* 2017. Vol. 46. P. 7229. doi 10.1039/C7CS00574A
4. *Wilson A.M., Bailey P.J., Tasker P.A.* // *Chem. Soc. Rev.* 2014. Vol. 43. P. 123.
5. *Werner E.J., Biros S.M.* // *Org. Chem. Front.* 2019. Vol. 6. P. 2067. doi 10.1039/CSQO00242A
6. *Bhattacharyya A., Mohapatra P.K.* // *Radiochim. Acta.* 2019. Vol. 107. P. 931. doi 10.1515/ract-2018-3064
7. *Розен А.М., Крупнов Б.В.* // *Усп. хим.* 1996. Т. 65. № 11. С. 1052; *Rozen A.M., Krupnov B.V.* // *Russ. Chem. Rev.* 1996. Vol. 65. N 11. P. 973. doi 10.1070/RC1996v065n11ABEH000241
8. *Розен А.М., Николотова З.И., Карташева Н.А., Юдина К.С.* // *Докл. АН СССР.* 1975. Т. 222. № 5. С. 1151.
9. *Розен А.М., Николотова З.И., Карташева Н.А.* // *Радиохимия.* 1986. Т. 28. № 3. С. 407.
10. *Туранов А.Н., Карандашев В.К., Харитонов А.В., Сафронова З.В., Яркевич А.Н.* // *Радиохимия.* 2000. Т. 42. № 4. С. 349.
11. *Turanov A.N., Karandashev V.K., Kharitonov, Yarkevich A.N., Safronova Z.V.* // *Solvent Extr. Ion Exch.* 2000. Vol. 18. P. 1109. doi 10.1080/07366290008934724
12. *Туранов А. Н., Карандашев В. К., Харитонов А.В., Сафронова З.В., Яркевич А. Н.* // *Радиохимия.* 2002. Т. 44. № 1. С. 19; *Turanov A.N., Karandashev V.K., Kharitonov A.V., Safronova Z.V., Yarkevich A.N.* // *Radiochemistry.* 2002. Vol. 44. N 1. P. 18. doi 10.1023/A:1014866932427
13. *Брель В.К., Артюшин О.И., Моргалюк В.П., Вологжанина А.В., Туранов А.Н., Карандашев В.К.* // *Коорд. хим.* 2022. Т. 48. № 4. С. 206; *Brel V.K., Artyushin O.I., Morgalyuk V.P., Vologzhanina A.V., Turanov A.N., Karandashev V.K.* // *Russ. J. Coord. Chem.* 2022. V. 48. N 4. P. 201. doi 10.1134/S1070328422040017
14. *Беркман З.А., Бертина Л.Э., Кабачник М.И., Косых В.Г., Медведь Т.Я., Нестерова Н.П., Розен А.М., Юдина К.С.* // *Радиохимия.* 1975. Т. 17. № 2. С. 210.
15. *Розен А.М., Николотова З.И., Карташева Н.А., Медведь Т.Я., Нестерова Н.П., Юдина К.С., Кабачник М.И.* // *Радиохимия.* 1976. Т. 18. № 6. С. 846.
16. *Matveeva A.G., Artyushin O.I., Pasechnik M.P., Stash A.I., Vologzhanina A.V., Matveev S.V., Godovikov I.A., Aysin R.R., Moiseeva A.A., Turanov A.N., Karandashev V.K., Brel V.K.* // *Polyhedron.* 2021. Vol. 198. 115085. doi 10.1016/j.poly.2021.115085
17. *Туранов А.Н., Карандашев В.К., Артюшин О.И., Костикова Г.В., Федосеев А.М., Брель В.К.* // *ЖОХ.* 2022. Т. 92. № 8. С. 1289; *Turanov A.N., Karandashev V.K., Artyushin O.I., Kostikova G.V., Fedoseev A.M., Brel V.K.* // *Russ. J. Gen. Chem.* 2022. Vol. 92. N 8. P. 1479. doi 10.1134/S1070363222080163
18. *Turanov A.N., Karandashev V.K., Artyushin O.I., Brel V.K.* // *Solvent Extr. Ion Exch.* 2020. V. 38. N. 2. P. 166. doi 10.1080/07366299.2019.1708001
19. *Smirnova E.V., Artyushin O.I., Vologzhanina A.V., Turanov A.N., Karandashev V.K., Brel V.K.* // *Mendelev Comm.* 2022. Vol. 32. N 5. P. 664. doi 10.1016/j.mencom.2022.09.032
20. *Konopkina E.A., Matveev P.I., Huang P.-W., Kirsanova A.A., Chernysheva M.G., Sumyanova T. B., Domnikov K.S., Shi W.-Q., Kalmykov S.N., Petrov V.G., Borisova N.E.* // *Dalton Trans.* 2022. Vol. 51. P. 11180. doi 10.139/d2dt01007k
21. *Zakirova G.G., Matveev P.I., Mladentsev D.Yu., Evsiunina M.V., Tafeenko V.A., Borisova N.E.* // *Mendelev Comm.* 2019. Vol. 29. N 4. P. 463. doi 10.1016/j.mencom.2019.07.037
22. *Matveev P.I., Borisova N.E., Andreadi N.G., Zakirova G.G., Petrov V.G., Belova E.V., Kalmykov S.N., Myasoedov B.F.* // *Dalton Trans.* 2019. Vol. 48. P. 2554. doi 10.1039/C8DT04729D
23. *Artyushin O.I., Vologzhanina A.V., Turanov A.N., Karandashev V.K., Brel V.K.* // *Mendelev Comm.* 2021. Vol. 31. P. 306. doi 10.1016/j.mencom.2021.05.009
24. *Davydova M.P., Bauer I.A., Brel V.K., Rakhmanova M.I., Bagryanskaya I.Yu., Artem'ev A.V.* // *Eur. J. Inorg. Chem.* 2020. P. 695. doi 10.1002/ejic.201901213
25. *Berezin A.S., Samsonenko D.G., Brel V.K., Artem'ev A.V.* // *Dalton. Trans.* 2018. Vol. 47. P. 7306. doi 10.1039/c8dt01041b
26. *Polok T., Schmidbauer H.* // *Tetrahedron Lett.* 1987. Vol. 28. N 10. P. 1085. doi 10.1016/S0040-4039(00)95917-3
27. *Nash K.L., Jensen M.P.* // *Sep. Sci. Technol.* 2001. Vol. 36. N 5–6. P. 1257. doi 10.1081/SS-100103649
28. *Tsvetkov E.N., Bondarenko N.A., Malakhova I.G., Kabachnik M.I.* // *Synthesis.* 1986. N 3. P. 198. doi 10.1055/s-1986-31510

# Synthesis and Extraction Properties of 2-(3,4-Diphenylphosphinylpyrrolidin-1-yl)ethanol and 3-(3,4-Diphenylphosphinylpyrrolidin-1-yl)propanol

A. N. Turanov<sup>a</sup>, V. K. Karandashev<sup>b</sup>, and V. K. Brel<sup>c,\*</sup>

<sup>a</sup> Yu.A. Ossipyan Institute of Solid State Physics of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia

<sup>b</sup> Institute of Microelectronics Technology and High Pure Materials of the Russian Academy of Sciences,  
Chernogolovka, 142432 Russia

<sup>c</sup> A.N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

\* e-mail: v\_brel@mail.ru

Received September 21, 2022; revised September 21, 2022; accepted October 6, 2022

A method for the synthesis of 2-(3,4-diphenylphosphinylpyrrolidin-1-yl)ethanol and 3-(3,4-diphenylphosphinylpyrrolidin-1-yl)propanol was developed and the extraction of U(VI), Th(IV) and lanthanides(III) from nitric acid solutions was studied. The stoichiometry of the extracted complexes was determined, the effect of the extractant structure and the concentration of HNO<sub>3</sub> in the aqueous phase on the efficiency of extraction of metal ions into the organic phase was considered. It was found that 2-(3,4-diphenylphosphinylpyrrolidin-1-yl)ethanol has a high extraction ability with respect to actinides and lanthanides in nitrate media.

**Keywords:** extraction, uranium(VI), thorium(IV), lanthanides(III), phosphine oxides