

ВЛИЯНИЕ ДИ-2-ЭТИЛГЕКСИЛСУЛЬФОСУКЦИНАТОВ 1-АЛКИЛ-3-МЕТИЛИМИДАЗОЛИЯ НА ЭКСТРАКЦИЮ ЛАНТАНИДОВ(III) 1,3-БИС[(ДИФЕНИЛФОСФОРИЛАЦЕТАМИДО)МЕТИЛ]- БЕНЗОЛОМ ИЗ АЗОТНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ

© 2023 г. А. Н. Туранов¹, В. К. Карандашев², О. И. Артюшин³, Е. В. Шарова^{3,*}

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

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

³ Институт элементоорганических соединений имени А. Н. Несмеянова Российской академии наук,
ул. Вавилова 28/1, Москва, 119334 Россия

*e-mail: sharovaev@mail.ru

Поступило в редакцию 15 сентября 2023 г.

После доработки 10 октября 2023 г.

Принято к печати 11 октября 2023 г.

Установлено, что эффективность экстракции ионов лантанидов(III) из азотнокислых растворов 1,3-бис-[(дифенилфосфорилацетамидо)метил]бензолом значительно увеличивается в присутствии ионных жидкостей – ди-2-этилгексилсульфосукцинатов 1-алкил-3-метилимидазолия в органической фазе. Изучено распределение ионных жидкостей между органической и водной фазами в зависимости от концентрации ионной жидкости и азотной кислоты. Методом сдвига равновесия определена стехиометрия экстрагируемых комплексов лантанидов(III). Рассмотрено влияние длины алкильных радикалов в катионной части ионной жидкости и концентрации HNO_3 в водной фазе на эффективность извлечения ионов металлов в органическую фазу, содержащую ионную жидкость.

Ключевые слова: экстракция, лантаниды(III), азотная кислота, карбамоилметилфосфиноксиды, ионные жидкости

DOI: 10.31857/S0044460X23110112, **EDN:** PCQHQO

Экстракционные методы широко используются в гидрометаллургии редких, рассеянных и цветных металлов, а также в процессах переработки отработанного ядерного топлива для извлечения, концентрирования и разделения актинидов и лантанидов (Ln) [1]. Высокой экстракционной способностью по отношению к ионам этих элементов в азотнокислых средах обладают бидентатные нейтральные фосфорорганические соединения, в частности, диарил- или алкил(арил)[диалкилкарбамоилметил]фосфиноксиды [2–5]. В последнее время все больший интерес привлекают карбамо-

илметилфосфиноксиды, содержащие вторичный амидный фрагмент $\text{C}(\text{O})\text{NHAlk}$ ($\text{Alk} = \text{C}_2\text{--C}_{12}$). По эффективности извлечения Am(III) из азотнокислых растворов эти соединения не уступают своим N,N-диалкилзамещенным аналогам, существенно выигрывая у них в синтетической доступности [6].

Известно, что введение в одну молекулу нескольких комплексообразующих группировок (например, карбамоилметилфосфиноксидной) способствует многократному повышению эффективности процесса экстракции [7]. Ранее мы показали, что связывание двух координирующих

$\text{Ph}_2\text{P}(\text{O})\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{NH}$ -фрагментов через амидные атомы азота ди- или триэтиленгликолевым спейсером, а также алкиленовым или ариленовым мостиком существенно увеличивает эффективность экстракции $\text{Ln}(\text{III})$, $\text{U}(\text{VI})$ и $\text{Th}(\text{IV})$ из азотнокислых растворов [8–11]. Значения коэффициентов распределения этих ионов при экстракции раствором 1,3-бис[(дифенилфосфорилацетидамидо)метил]бензола, содержащего два бидентатных фрагмента $\text{Ph}_2\text{P}(\text{O})\text{CH}_2\text{C}(\text{O})\text{NH}$, закрепленных на ксиленовых линкерах через амидные атомы азота в *m*-положении на молекуле бензола, более чем на два порядка выше, чем у его моно-карбамоилметилфосфиноксидного аналога [11].

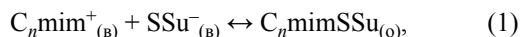
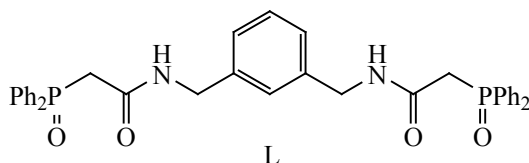
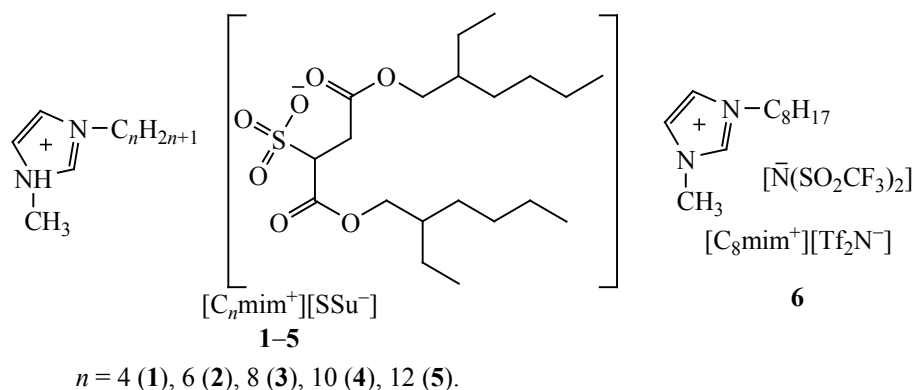
В последнее время возрос интерес к использованию в экстракционной практике ионных жидкостей в качестве несмешивающейся с водой фазы [12–21]. Это связано с наличием у них комплекса уникальных физико-химических свойств, таких, как превосходная сольватационная способность, высокие значения диэлектрической проницаемости, низкая летучесть, негорючесть, что нехарактерно для традиционных органических растворителей [14]. Было показано, что ионы актинидов и $\text{Ln}(\text{III})$ экстрагируются растворами карбамоилметилфосфиноксидов в ионных жидкостях – гексафторфосфатах и бис[(трифторметил)сульфонил]имидах 1-метил-3-алкилимидазолия – значительно более эффективно, чем растворами карбамоилметилфосфиноксидов в традиционных молекулярных растворителях [22, 23]. Было установлено, что для эффективного извлечения лантанидов и актинидов из растворов HNO_3 достаточно даже относительно небольшой концентрации ионных жидкостей в органическом растворителе, содержащем карбамоилметилфосфиноксиды [24, 25]. Этот эффект объясняется высокой гидрофобностью анионов ионных жидкостей, которые участвуют в образовании экстрагируемых комплексов в качестве противоионов, что приводит к повышению их гидрофобности и облегчает переход ионов металлов в органический разбавитель. В настоящее время синтезированы десятки различных ионных жидкостей и установлены некоторые закономерности влияния их структуры на экстракцию ионов металлов [14–17]. Поскольку процесс экстракции ионов металлов в присутствии ионных жидкостей осуществляется по катионно-обменному механизму

[13], он сопровождается заметным переходом компонентов ионных жидкостей в водную фазу. Это не только приводит к заметным потерям ионных жидкостей, но и создает дополнительные экологические проблемы при их использовании в экстракционных процессах [12]. В большинстве опубликованных работ по экстракции ионов металлов использовали ионные жидкости на основе аниона бис[(трифторметил)сульфонил]имида (Tf_2N^-) [17]. Интерес к использованию в экстракционной практике ионных жидкостей с анионами, не содержащими фтора, в частности диалкилсульфосукцинатами, связан с их большей доступностью и значительно меньшей токсичностью [26]. Ранее было показано, что эффективность экстракции $\text{Ln}(\text{III})$, $\text{U}(\text{VI})$ и $\text{Th}(\text{IV})$ из азотнокислых растворов дифенил(дибутилкарбамоилметил)фосфиноксидом значительно увеличивается в присутствии диалкилсульфосукцинатов 1-метил-3-бутилимидазолия, а увеличение гидрофобности анионной части этих ионных жидкостей приводит к увеличению коэффициентов распределения ионов актинидов и лантанидов [27].

Цель данной работы – исследование влияния природы катионной части ионных жидкостей на эффективность экстракции лантанидов(III) из азотнокислых растворов. Для этого рассмотрено межфазное распределение $\text{Ln}(\text{III})$ между растворами HNO_3 и органической фазой, содержащей бискарбамоилметилфосфиноксидный лиганд – 1,3-бис[(дифенилфосфорилацетидамидо)метил]бензол (L) – и ди-2-этилгексилсульфосукцинат 1-метил-3-алкилимидазолия (схема 1). Сопоставлено влияние ди-2-этилгексилсульфосукцината 1-метил-3-октилимидазолия **3** и бис[(трифторметил)сульфонил]имида 1-метил-3-октилимидазолия **6** на экстракцию ионов $\text{Ln}(\text{III})$.

Для оценки гидрофобности исследованных ионных жидкостей **1–6** рассмотрено распределение анионов этих ионных жидкостей между дихлорэтаном и водной фазой. Увеличение концентрации ионных жидкостей в органической фазе сопровождается увеличением коэффициентов распределения анионов ионных жидкостей (*D*) (рис. 1). Равновесие между компонентами органической и водной фаз может быть описано уравнением (1).

Схема 1.



где SSu^- – анион ионных жидкостей; символы (о) и (в) относятся к компонентам системы в органической и водной фазах соответственно.

Константа распределения ионных жидкостей между органической и водной фазами может быть выражена следующим образом:

$$K = [C_n\text{mimSSu}]_{(O)} [C_n\text{mim}^+]_{(B)}^{-1} [\text{SSu}^-]_{(B)}^{-1}. \quad (2)$$

С использованием данных рис. 1 по уравнению (2) рассчитаны константы распределения ионных жидкостей **1–6** между дихлорэтаном и водой, значения которых приведенные в табл. 1. Из этих данных видно, что увеличение длины алкильных групп в катионной части ионных жидкостей способствует увеличению гидрофобности ионных жидкостей. Гидрофобность ионной жидкости **3** существенно выше, чем ионной жидкости **6** с анионом Tf_2N^- (табл. 1). Это определяет значительно меньшие потери ионных жидкостей на основе анионов диалкилсульфосукцинатов в процессе экстракции ионов металлов. При изучении зависимости коэффициентов распределения анионов ионных жидкостей от концентрации HNO_3 в водной фазе было установлено, что с ростом кон-

центрации HNO_3 наблюдается увеличение перехода компонентов ионных жидкостей в водную фазу (рис. 2). Подобное явление наблюдалось ранее при распределении аниона Tf_2N^- между органической и водной фазами и было объяснено образованием существенно менее гидрофобных ассоциатов $[C_n\text{mim}^+][\text{NO}_3^-]$ в азотнокислых средах [28].

Исследована зависимость коэффициентов распределения ионов Ln(III) (D_{Ln}) от концентрации HNO_3 в водной фазе при экстракции лигандом и его смесями с ионными жидкостями **3** и **6**, а также растворами **3** и **6** в дихлорэтане. На рис. 3 приведены данные по экстракции Eu(III) , аналогичные зависимости получены для других Ln(III) . При экстракции растворами лиганда в дихлорэтане

Таблица 1. Константы распределения ионных жидкостей **1–6** между дихлорэтаном и водой

Ионная жидкость	lgK
1	5.48±0.15
2	6.24±0.17
3	6.98±0.18
4	7.74±0.21
5	9.34±0.27
6	5.93±0.15

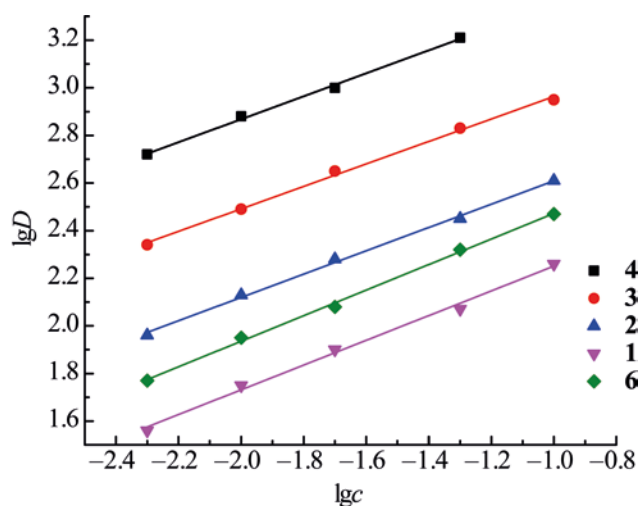


Рис. 1. Зависимость коэффициентов распределения анионов ионных жидкостей 1–4 и 6 между дихлорэтаном и водой от концентрации ионной жидкости в дихлорэтано.

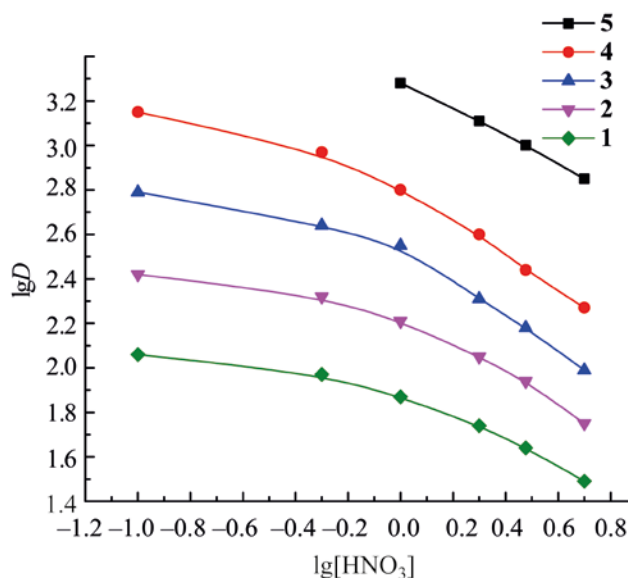


Рис. 2. Зависимость коэффициентов распределения анионов ионных жидкостей 1–5 от концентрации HNO_3 в равновесной водной фазе при экстракции 0.05 М. растворами ионных жидкостей в дихлорэтано.

величины D_{Eu} возрастают с увеличением $[\text{HNO}_3]$ до 3 моль/л и затем несколько снижаются, что связано со снижением концентрации свободного

экстрагента в органической фазе вследствие соэкстракции азотной кислоты [11]. Такой характер зависимости $D_{\text{Eu}}-[\text{HNO}_3]$ соответствует экстракции ионов металлов по сольватному механизму.

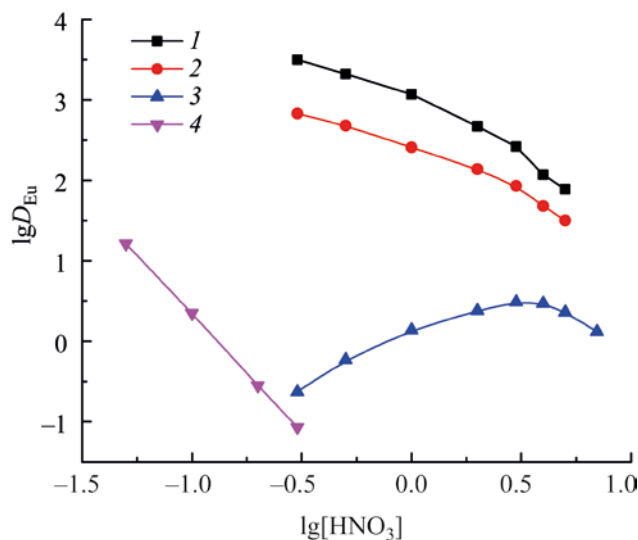


Рис. 3. Зависимость коэффициентов распределения $\text{Eu}(\text{III})$ от концентрации HNO_3 в равновесной водной фазе при экстракции растворами 0.01 моль/л лиганда (3) и 0.05 моль/л соединения 3 (4) в дихлорэтано и растворами 0.01 моль/л лиганда в дихлорэтано, содержащем 0.05 моль/л ионных жидкостей 3 (1) и 6 (2).

Существенным отличием ионных жидкостей 3 и 6 с одинаковым катионом $[\text{C}_8\text{mim}^+]$ является то, что ионная жидкость 3 с диалкилсульфосукцинат-анионом обладает способностью экстрагировать ионы $\text{Ln}(\text{III})$ из нейтральных и слабокислых растворов. Ранее способность дигексилсульфосукцината тетрагексиламмония экстрагировать ионы Cs^+ отмечалась в работе [29]. Способность ионной жидкости 3 экстрагировать ионы $\text{Ln}(\text{III})$ резко снижается с увеличением кислотности водной фазы (рис. 3). В таких же условиях ионы $\text{Ln}(\text{III})$ практически не экстрагируются растворами ионной жидкости 6 с Tf_2N^- -анионом (величины D_{Ln} не превышают 10^{-2}).

При экстракции смесями лиганда и ионных жидкостей 3 или 6 в дихлорэтано происходит значительное увеличение степени извлечения ионов $\text{Ln}(\text{III})$ в органическую фазу (рис. 3). Наблюдаемый синергетический эффект может быть связан с вхождением гидрофобных диалкилсульфосук-

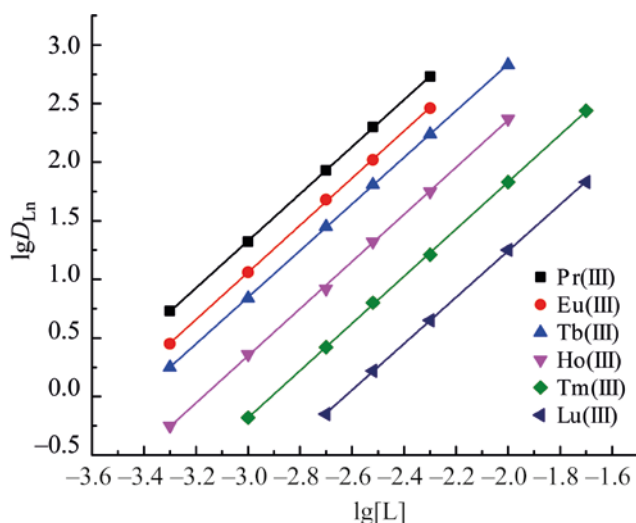
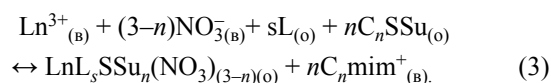


Рис. 4. Зависимость коэффициентов распределения Ln(III) от концентрации лиганда в дихлорэтане, содержащем 0.05 моль/л ионной жидкости **3**, при экстракции из 1 М. раствора HNO₃.

цинат-анионов в состав экстрагируемых комплексов, приводящим к увеличению их гидрофобности по сравнению с сольватированными нитратами Ln(III), экстрагируемыми растворами лиганда из азотнокислых растворов. Величина синергетического эффекта $SC = D/(D_L + D_{ИЖ})$ (где D_L , $D_{ИЖ}$ и D – коэффициенты распределения при экстракции индивидуальными лигандом, ионной жидкостью и их смесями соответственно) уменьшается с ростом концентрации HNO₃ в водной фазе (рис. 3). Так, при экстракции Eu(III) смесями лиганда и соединения **3** увеличение концентрации HNO₃ от 0.5 до 5 моль/л сопровождается снижением величины SC от 3550 до 34, а при экстракции смесями лиганда и соединения **6** величина SC снижается от 815 до 14.

При экстракции ионов Ln(III) растворами лиганда в присутствии ионной жидкости **3** или **6** наблюдается снижение D_{Eu} с ростом концентрации HNO₃ (рис. 3). Такой же характер зависимости D_{Ln} –[HNO₃] наблюдался при экстракции Ln(III) смесями нейтральных экстрагентов и ионных жидкостей в дихлорэтане [22, 27]. Это связано с изменением механизма экстракции ионов металлов нейтральными донорно-активными экстрагентами от сольватного к катионнообменному в системах с ионными жидкостями (3).



Стехиометрическое соотношение металл–лиганд в комплексах Ln(III), экстрагируемых в присутствии ионной жидкости **3**, определено методом сдвига равновесия. При постоянной концентрации HNO₃ в водной фазе и ионной жидкости **3** в органической, угловой наклон зависимостей $\lg D_{Ln}$ – $\lg[L]$ близок к 2 (рис. 4). Это указывает на экстракцию ионов Ln(III) из азотнокислых растворов в виде дисольватов.

Как следует из уравнения (3), увеличение концентрации катиона ионных жидкостей в водной фазе приводит к сдвигу равновесия (3) вправо и уменьшению величины D_{Ln} . Исследована зависимость D_{Ln} от концентрации хлорида 1-метил-3-октилимидазолия в водной фазе. При постоянной концентрации HNO₃ в водной фазе и лиганда в органической, угловой наклон зависимостей $\lg D_{Ln}$ – $\lg[c]$ составляет 1.11 ± 0.12 (рис. 4), что указывает на участие одной молекулы ионной жидкости **3** в катионно-обменной реакции (3) и переход ионов Ln(III) в органическую фазу в виде комплексов $\text{LnL}_2\text{SSu}(\text{NO}_3)_2$.

Природа катиона и аниона ионных жидкостей оказывает существенное влияние на эффективность экстракции ионов Ln(III) из азотнокислых растворов смесями лиганда и ионной жидкости. При экстракции Ln(III) раствором лиганда в присутствии ионных жидкостей **3** и **6** с одинаковым катионом [C₈mim⁺] более высокие значения D_{Ln} отмечаются в системе с ионной жидкостью **3** (рис. 5, 6), что соответствует большей гидрофобности ди-2-этилгексилсульфосукцинат-аниона по сравнению с анионом бис[(трифторметил)сульфонил]имида (табл. 1).

Эффективность экстракции Ln(III) смесями лиганда и ионных жидкостей с анионом ди-2-этилгексилсульфосукцинат-анионом возрастает в ряду **5** < **4** < **3** < **2** < **1** (рис. 6) по мере уменьшения гидрофобности катиона ионных жидкостей. При этом наблюдается линейная корреляция величин $\lg D_{Ln}$ и $\lg D_{SSu}$ при постоянной концентрации экстрагента L в органической фазе и концентрации HNO₃ в водной (рис. 7).

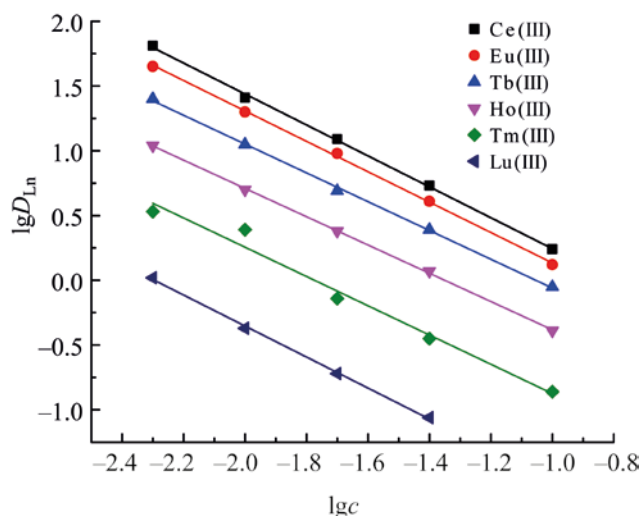


Рис. 5. Зависимость коэффициентов распределения Ln(III) от концентрации хлорида 1-метил-3-октилимидазолия в водной фазе, содержащей 1 моль/л HNO_3 , при экстракции 0.01 М. раствором лиганда в дихлорэтане, содержащем 0.05 моль/л ионной жидкости **3**.

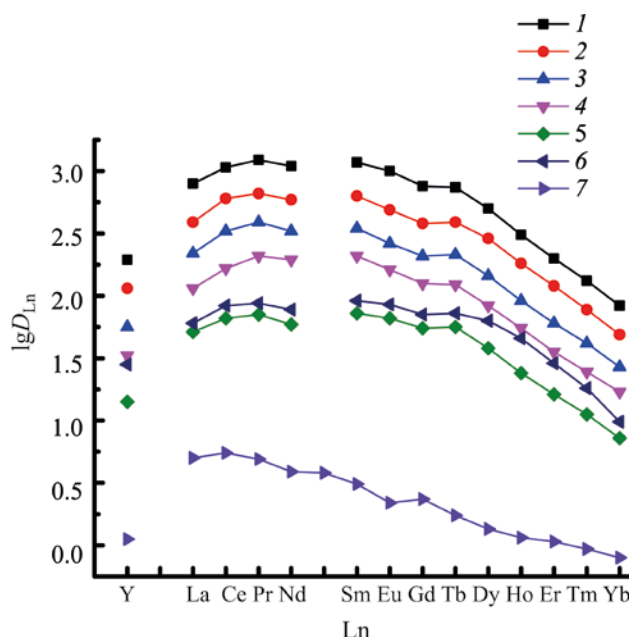


Рис. 6. Коэффициенты распределения Ln(III) и Y(III) при экстракции из 3 М. растворов HNO_3 0.01 М. растворами лиганда в дихлорэтане (**7**) и в дихлорэтане, содержащем 0.05 моль/л ионных жидкостей **1** (**1**), **2** (**2**), **3** (**3**), **4** (**4**), **5** (**6**) и **6** (**5**).

Полученные данные показали, что эффективность экстракции Ln(III) из азотнокислых растворов растворами 1,3-бис[(дифенилфосфорилацетида)метил]бензола значительно увеличивается в

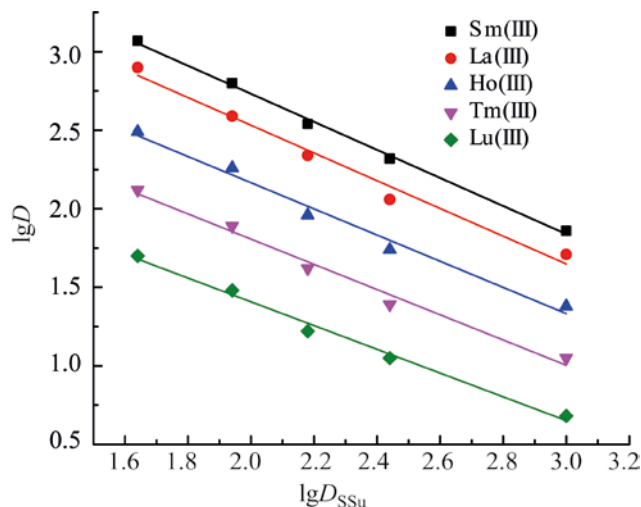


Рис. 7. Взаимосвязь коэффициентов распределения Ln(III) и аниона ди-2-этилгексилсульфосукцината при экстракции из 3 М. растворов HNO_3 0.01 М. растворами лиганда в дихлорэтане, содержащем 0.05 моль/л ионных жидкостей **1–5**.

присутствии ионных жидкостей – ди-2-этилгексилсульфосукцинатов 1-алкил-3-метилимидазолия – в органической фазе. Увеличение гидрофобности катионов ионных жидкостей сопровождается уменьшением эффективности экстракции ионов Ln(III) из азотнокислых растворов. Увеличение гидрофобности ионной жидкости **3** по сравнению с ионной жидкостью **6** на основе аниона бис[(трифторметил)сульфонил]имида определяет существенно меньший переход этих ионных жидкостей в водную фазу в процессе экстракции.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез 1,3-бис[(дифенилфосфорилацетида)метил]бензола описан ранее [30]. Ди-2-этилгексилсульфосукцинаты 1-алкил-3-метилимидазолия получали по методике [31] взаимодействием хлоридов 1-алкил-3-метилимидазолия (Sigma Aldrich) с ди-2-этилгексилсульфосукцинатом натрия (Acros Organics). Бис[(трифторметил)сульфонил]имид 1-октил-3-метилимидазолия получали взаимодействием хлорида 1-октил-3-метилимидазолия с бис[(трифторметил)сульфонил]имидом лития (Merck) согласно методике [32]. В каче-

стве органического растворителя использовали 1,2-дихлорэтан (ХЧ).

Исходные водные растворы Ln(III) готовили растворением соответствующих нитратов в воде с последующим добавлением HNO_3 . Исходная концентрация ионов металлов составляла 1×10^{-5} моль/л. Контакт фаз осуществляли при комнатной температуре ($22 \pm 2^\circ\text{C}$) на роторном аппарате со скоростью 60 об/мин в течение 1 ч. Предварительно установлено, что этого времени достаточно для установления постоянных значений коэффициентов распределения элементов в экстракционных системах.

Концентрацию Ln(III) в исходных и равновесных водных растворах определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой с использованием масс-спектрометра XSeries 2 (ThermoScientific, США). Содержание элементов в органической фазе определяли как разницу между концентрациями до и после экстракции. Коэффициенты распределения элементов рассчитывали, как отношение их концентраций в равновесных органической и водной фазах. Погрешность определения коэффициентов распределения не превышала 10%. Концентрацию HNO_3 в равновесной водной фазе определяли потенциометрическим титрованием раствором NaOH. Концентрацию ди-2-этилгексилсульфосукцинат- и бис[(трифторметил)сульфонил]имид-ионов в равновесных водных фазах определяли путем определения содержания серы в растворах атомно-эмиссионным методом с ионизацией пробы в индуктивно связанной плазме с использованием спектрометра ICAP-61 (Thermo Jarrel Ash, США) по ранее описанной методике [33].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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

Шарова Елена Владимировна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5428-596X>

Артюшин Олег Иванович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6333-5973>

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской

Федерации в рамках государственного задания на 2023 г. Института физики твердого тела им. Ю.А. Осипяна РАН, Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН и Института элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН (№ 075-03-2023-642) с использованием научного оборудования Центра исследования строения молекул Института элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Myasoedov B.F., Kalmykov S.N. // *Mendeleev Commun.* 2015. Vol. 25. N 5. P. 319. doi 10.10016/j.mencom.2015.09.001
2. Leoncini A., Huskens J., Verboom W. // *Chem. Soc. Rev.* 2017. Vol. 46. P. 7229. doi 10.1039/C7CS00574A
3. Аляпышев М.Ю., Бабаин В.А., Устынюк Ю.А. // *Усп. хим.* 2016. Т. 85. № 9. С. 943; Alyapyshev M.Yu., Babain V.A., Ustynyuk Yu.A. // *Russ. Chem. Rev.* 2016. Vol. 85. N 9. P. 943. doi 10.1070/RCR4588
4. Horwitz E.P., Martin K.A., Diamond H., Kaplan L. // *Solv. Extr. Ion Exch.* 1986. Vol. 4. N 3. P. 449. doi 10.1080/07366298608917877
5. Чмутова 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. Шарова Е.В., Артющин О.И., Одинец И.Л. // *Усп. хим.* 2014. Т. 83. № 2. С. 95; Sharova E.V., Artyushin O.I., Odinets I.L. // *Russ. Chem. Rev.* 2014. Vol. 83. N 2. P. 95. doi 10.1070/RC2014v083n02ABEH004384
7. Dam H.H., Reinhoudt D.N., Verboom W. // *Chem. Soc. Rev.* 2007. Vol. 36. P. 367. doi 10.1039/b603847f
8. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Шарова Е.В., Артющин О.И., Одинец И.Л. // *Радиохимия.* 2010. Т. 52. С. 219; Turanov A.N., Karandashev V.K., Sharova E.V., Artyushin O.I., Odinets I.L. // *Radiochemistry.* 2010. Vol. 52. P. 258. doi 10.1134/S1066362210030069
9. Turanov A.N., Karandashev V.K., Sharova E.V., Artyushin O.I., Odinets I.L. // *Solvent Extr. Ion Exch.* 2012. Vol. 30. P. 604. doi 10.1080/07366299.2012.671117
10. Turanov A.N., Karandashev V.K., Sharova E.V., Artyushin O.I. // *Solvent Extr. Ion Exch.* 2016. Vol. 34. P. 26. doi 10.1080/07366299.2015.1129197
11. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Шарова Е.В., Артющин О.И., Одинец И.Л. // *Радиохимия.* 2012. Т. 54.

- C. 47; Turanov A.N., Karandashev V.K., Sharova E.V., Artyushin O.I., Odinets I.L. // Radiochemistry. 2012. Vol. 54. P. 48. doi 10.1134/S1066362212010067
12. Kolarik Z. // Solvent Extr. Ion Exch. 2013. Vol. 31. P. 24. doi 10.1080/07366299.2012.700589
13. Dietz M.L. // Sep. Sci. Technol. 2006. Vol. 41. P. 2047. doi 10.1080/01496390600743144
14. Sun X., Luo H., Dai S. // Chem. Rev. 2012. Vol. 112. P. 2100. doi 10.1021/cr200193x
15. Shkrob I.A., Marin T.W., Jensen M.P. // Ind. Eng. Chem. Res. 2014. Vol. 53. P. 3641. doi 10.1021/ie4036719
16. Iqbal M., Waheed K., Rahat S.B., Mehmood T., Lee M.S. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2020. Vol. 325. P. 1. doi 10.1007/s10967-020-07199-1
17. Okamura H., Hirayama N. // Anal. Sci. 2021. Vol. 37. P. 119. doi 10.2116/analsci.20SAR11
18. Белова В.В. // Радиохимия. 2021. Т. 63. С. 3; Belova V.V. // Radiochemistry. 2021. Vol. 63. P. 1. doi 10.1134/S106636222101001X
19. Quijada-Maldonado E., Olea F., Supulveda R., Castillo J., Cabezas R., Merlet G., Romero J. // Sep. Pur. Technol. 2020. Vol. 251. 117289. doi 10.1016/j.seppur.2020.117289
20. Wang K., Adidharma H., Radosz M., Wan P., Xu X., Russell C.K., Tian H., Fan M., Yu J. // Green Chem. 2017. Vol. 19. P. 4469. doi 10.1039/c7gc02141k
21. Atanassova M. // J. Mol. Liq. 2021. Vol. 343. 117530. doi 10.1016/j.molliq.2021.117530
22. Nakashima K., Kubota F., Maruyama T., Goto M. // Ind. Eng. Chem. Res. 2005. Vol. 44. P. 4368. doi 10.1021/ie049050t
23. Sun T., Zhang Y., Wu Q., Chen J., Xia L., Xu C. // Solvent Extr. Ion Exch. 2017. Vol. 35. P. 408. doi 10.1080/07366299.2017.1379142
24. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Яркевич А.Н. // Радиохимия. 2018. Т. 60. № 2. С. 153; Turanov A.N., Karandashev V.K., Yarkevich A.N. // Radiochemistry. 2018. Vol. 60. N 2. P. 170. doi 10.1134/S1066362218020078
25. Pribilova G., Smirnov I., Novikov A. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2013. Vol. 295. P. 83. doi 10.1007/s10967-012-2220-1
26. Dib N., Dario Falcone R., Acuna A., Garcia-Rio L. // J. Mol. Liq. 2020. Vol. 304. 112762. doi 10.1016/j.molliq.2020.112762
27. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Бурмий Ж.П., Яркевич А.Н. // ЖОХ. 2022. Т. 92. № 3. С. 470; Turanov A.N., Karandashev V.K., Burmii Zh.P., Yarkevich A.N. // Russ. J. Gen. Chem. 2022. Vol. 92. N 3. P. 418 doi 10.1134/S1070363222030082
28. Turanov A.N., Karandashev V.K., Baulin V.E. // Solvent Extr. Ion Exch. 2008. Vol. 26. P. 77. doi 10.1080/07366290801904871
29. Vendilo A.G., Djigailo D.I., Smirnova S.V., Torocheshnikova I.I., Popov K.I., Krasovsky V.G., Pletnev I.V. // Molecules. 2009. Vol. 14. P. 5001. doi 10.3390/molecules144125001
30. Артюшин О.И., Шарова Е.В., Оди́нец И.Л., Лысенко К.А., Голованов Д.Г., Мاستрюкова Т.А., Прибылова Г.А., Тананаяев И.Г., Мясоедова Г.В. // Изв. АН. Сер. хим. 2006. Т. 55. № 8. С. 1387; Artyushin O.I., Sharova E.V., Odinets I.L., Lyssenko K.A., Golovanov D.G., Mastryukova T.A., Pribylova G.A., Tananayev I.G., Myasoedova G. V. // Russ. Chem. Bull. 2006. Vol. 55. N 8. P. 1440. doi 10.1007/s11172-006-0437-2
31. Brown P., Butts C.P., Eastoe J., Fermin D., Grillo I., Lee H.-C., Parker D., Plana D., Richardson R.M. // Langmuir. 2012. Vol. 28. P. 2502. doi 10.1021/la204557t
32. Bonhote P., Dias A.P., Papageorgiou N., Kalyanasundaram K., Grätzel M. // Inorg. Chem. 1996. Vol. 35. P. 1168. doi 10.1021/ic951325x
33. Карандашев В.К., Лейкин А.Ю., Хвостиков В.А., Куцеева Н.К., Пирогова С.В. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 5. С. 5.; Karandashev V.K., Leikin A.Yu., Khvostikov V.A., Kutseva N.K., Pirogova S.V. // Inorg. Mater. 2016. Vol. 52. N. 14. P. 1391. doi 10.1134/S0020168516140053

**Effect of 1-Alkyl-3-methylimidazolium
Di-2-ethylhexylsulfosuccinate
on the Extraction of Lanthanides(III)
with 1,3-Bis[(diphenylphosphorylacetamido)methyl]benzene
from Nitric Acid Solutions**

A. N. Turanov^a, V. K. Karandashev^b, O. I. Artyushin^c, and E. V. Sharova^{c,*}

^a *Yu. A. Osipyan Institute of Solid State Physics, Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, 142432 Russia*

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

^c *A. N. Nesmeyanov Institute of Organoelement Compounds, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*

**e-mail: sharovaev@mail.ru*

Received September 15, 2023; revised October 10, 2023; accepted October 11, 2023

It was found that the efficiency of extraction of lanthanide(III) ions from nitric acid solutions with 1,3-bis[(diphenylphosphorylacetamido)methyl]benzene significantly increases in the presence of ionic liquids, 1-alkyl-3-methylimidazolium di-2-ethylhexylsulfosuccinates, in the organic phase. The partition of ionic liquids between the organic and aqueous phases was studied depending on the concentration of the ionic liquid and nitric acid. The stoichiometry of the extractable lanthanide(III) complexes was determined by the equilibrium shift method. The influence of the length of alkyl radicals in the cationic part of the ionic liquid and the concentration of HNO₃ in the aqueous phase on the efficiency of the extraction of metal ions into the organic phase containing the ionic liquid was considered.

Keywords: extraction, lanthanides(III), nitric acid, carbamoylmethylphosphine oxides, ionic liquids