

ВЛИЯНИЕ ИОННЫХ ЖИДКОСТЕЙ НА ОСНОВЕ ДИАЛКИЛСУЛЬФОСУКЦИНАТ-АНИОНОВ НА ЭКСТРАКЦИЮ ЛАНТАНИДОВ(III), УРАНА(VI) И ТОРИЯ(IV) ДИФЕНИЛ(ДИБУТИЛКАРБАМОИЛМЕТИЛ)-ФОСФИНОКСИДОМ ИЗ АЗОТНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ

© 2022 г. А. Н. Туранов^a, В. К. Карандашев^{b,*}, Ж. П. Бурмий^b, А. Н. Яркевич^c

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

^b Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук, ул. Академика Осипьяна 6, Черноголовка, 142432 Россия

^c Институт физиологически активных веществ Российской академии наук, Черноголовка, 142432 Россия
e-mail: karan@iptm.ru

Поступило в Редакцию 17 декабря 2021 г.

После доработки 23 января 2022 г.

Принято к печати 28 января 2022 г.

Эффективность экстракции ионов лантанидов(III), урана(VI) и тория(IV) из азотнокислых растворов растворами дифенил(дибутилкарбамоилметил)фосфинооксида значительно увеличивается в присутствии ионных жидкостей – диалкилсульфосукцинатов 1-бутил-3-метилимидазолия в органической фазе. Изучено распределение ионных жидкостей между органической и водной фазами в зависимости от концентраций ионной жидкости и азотной кислоты. Методом сдвига равновесия определена стехиометрия экстрагируемых комплексов лантанидов(III), урана(VI) и тория(IV). Рассмотрено влияние длины алкильных радикалов в анионной 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), уран(VI), торий(IV), азотная кислота, карбамоилметилфосфиноксиды, ионные жидкости

DOI: 10.31857/S0044460X22030088

Экстракционные методы широко используются при переработке отработанного ядерного топлива для извлечения, концентрирования и разделения актинидов и лантанидов [1]. Высокой экстракционной способностью по отношению к ионам актинидов и лантанидов (Ln) в азотнокислых средах обладают бидентатные нейтральные фосфорорганические соединения, в частности, диарил(диалкилкарбамоилметил)фосфиноксиды [2–6]. В последнее время рассматривается возможность ис-

пользования в экстракционной практике ионных жидкостей в качестве несмешивающейся с водой фазы при экстракции ионов металлов [7–14]. Ионы актинидов и Ln(III) экстрагируются растворами карбамоилметилфосфиноксидов в ионных жидкостях – гексафторфосфатах и бис[(трифторметил)сульфонил]имидах 1-алкил-3-метилимидазолия – значительно более эффективно, чем растворами карбамоилметилфосфиноксидов в традиционных растворителях [14]. Для эффективного извлече-

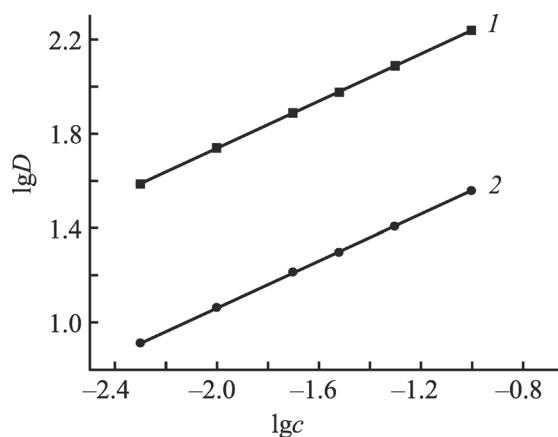


Рис. 1. Зависимость коэффициентов распределения анионов ионных жидкостей **1** (**1**) и **2** (**2**) между дихлорэтаном и водой от концентрации ионных жидкостей в дихлорэтане.

ния лантанидов и актинидов из растворов в HNO_3 или в HCl достаточно относительно небольшой концентрации ионной жидкости в органическом растворителе, содержащем карбамоилметилфосфиноксид [15].

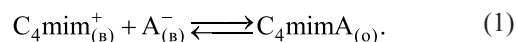
Как правило, для экстракции ионов металлов использовали ионные жидкости на основе катионов 1-алкил-3-метилимидазолия ($[\text{C}_n\text{mim}]^+$). Увеличение длины алкильного радикала в катионе приводит к уменьшению эффективности экстракции актинидов и $\text{Ln}(\text{III})$ в системе карбамоилметилфосфиноксид–ионная жидкость [14]. Использование бис[(трифторметил)сульфонил]имидата (Tf_2N^-) в качестве анионного компонента ионной жидкости обусловлено его высокой гидрофобностью, гидролитической и радиолитической устойчивостью в азотнокислых средах по сравнению с

анионом гексафторфосфата [7]. Тенденция к использованию в экстракционной практике ионных жидкостей с анионами, не включающими фтора, в частности, диалкилсульфосукцинатами, связана с их большей доступностью и меньшей токсичностью [16].

Нами исследовано влияние природы анионной части ионных жидкостей на эффективность экстракции лантанидов(III), урана(VI) и тория(IV) из азотнокислых растворов растворами дифенил(дибутилкарбамоилметил)фосфиноксида (**L**) в органическом растворителе. Для этого рассмотрено межфазное распределение $\text{Ln}(\text{III})$, $\text{U}(\text{VI})$ и $\text{Th}(\text{IV})$ между растворами HNO_3 и органической фазой, содержащей соединение **L** и ди-2-этилгексил- (**1**) или дигексил- (**2**) сульфосукцината 1-бутил-3-метилимидазолия (схема 1)

Для оценки гидрофобности ионных жидкостей **1** и **2** рассмотрено распределение анионов этих жидкостей между дихлорэтаном и водной фазой. Увеличение концентрации ионной жидкости в органической фазе сопровождается увеличением коэффициентов распределения анионов (D_A^-) (рис. 1).

Равновесие между компонентами органической и водной фаз может быть описано уравнением (1).

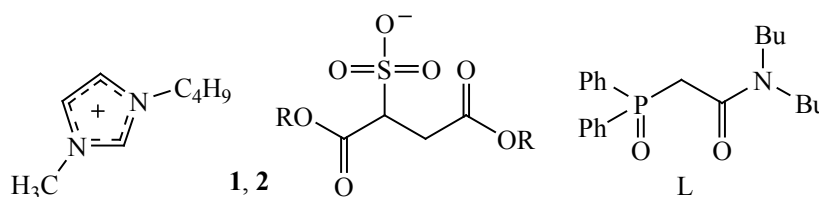


Здесь A^- – анион ионной жидкости; символы (о) и (в) относятся к компонентам системы в органической и водной фазах соответственно.

Концентрационная константа распределения ионной жидкости между органической и водной фазами имеет вид (2).

$$K = [\text{C}_4\text{mimA}]_{(\text{о})} [\text{C}_4\text{mim}^+]_{(\text{в})}^{-1} + [\text{A}^-]_{(\text{в})}^{-1}. \quad (2)$$

Схема 1.



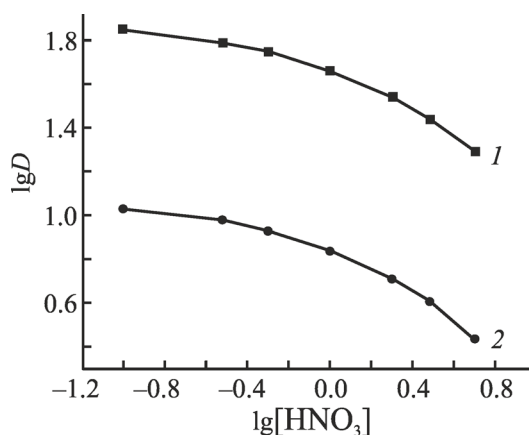


Рис. 2. Зависимость коэффициентов распределения анионов ионных жидкостей **1** (*1*) и **2** (*2*) от концентрации HNO_3 в равновесной водной фазе при экстракции 0.02 М. растворами ионных жидкостей **1** и **2** в дихлорэтане.

Значения концентрационных констант распределения ионных жидкостей **1** и **2** между дихлорэтаном и водой, рассчитанные с использованием данных рис. 1 по уравнению (2), составляют $(3.02 \pm 0.17) \times 10^5$ (R^2 0.998) и $(1.32 \pm 0.08) \times 10^4$ (R^2 0.997) соответственно. Таким образом, увеличение длины алкильных заместителей в анионной части ионной жидкости приводит к увеличению ее гидрофобности. Гидрофобность ионных жидкостей **1** и **2** существенно выше, чем ионных жидкостей с анионом Tf_2N^- (константа распределения $\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}$ между дихлорэтаном и водой составляет 7940 [17]). Поэтому потеря ионных жидкостей на основе анионов диалкилсульфосукцинатов при экстракции ионов металлов значительно меньше. Увеличение концентрации HNO_3 в водной фазе приводит к снижению коэффициента распределения D_A^- (рис. 2), что отмечалось ранее при распределении аниона Tf_2N^- между органической и водной фазами [17]. Это связано с образованием C_4mimNO_3 в азотнокислых средах.

В отличие от имидазолиевых ионных жидкостей с анионами Tf_2N^- ионные жидкости **1** и **2** с диалкилсульфосукцинат-анионами обладают способностью экстрагировать ионы металлов из нейтральных и слабокислых растворов [18]. Способность ионной жидкости **1** экстрагировать ионы

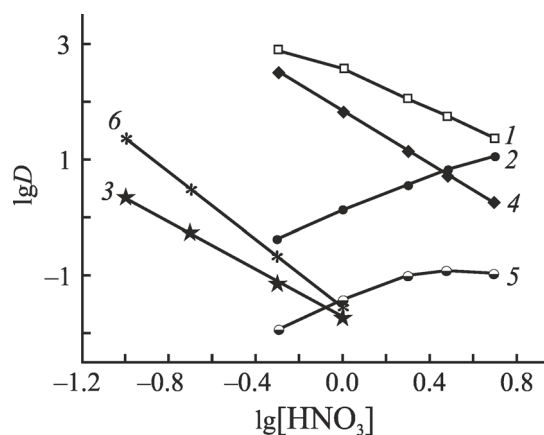


Рис. 3. Зависимость коэффициентов распределения U(VI) (*1–3*) и Eu(III) (*4–6*) от концентрации HNO_3 в равновесной водной фазе при экстракции растворами соединений **L** (*2, 5*) и **1** (*3, 6*) в дихлорэтане и растворами **L** в дихлорэтане, содержащем 0.1 моль/л ионной жидкости **1** (*1, 4*). Концентрация **L**, моль/л: 0.02 (*4, 5*); 0.005 (*1, 2*).

металлов резко снижается с увеличением кислотности водной фазы (рис. 3), и при $[\text{HNO}_3] > 2$ моль/л растворы соединения **1** в дихлорэтане практически не экстрагируют Ln(III) , U(VI) и Th(IV) из азотнокислых растворов (коэффициенты распределения D не превышают 10^{-2}). Однако при экстракции смесями соединений **L** и **1** в дихлорэтане происходит значительное увеличение степени извлечения этих элементов в органическую фазу (рис. 3). Наблюдаемый синергетический эффект может быть связан с вхождением гидрофобных диалкилсульфосукцинат-анионов в состав экстрагируемых комплексов, приводящим к увеличению их гидрофобности по сравнению с сольватированными нитратами Ln(III) , U(VI) и Th(IV) , экстрагируемыми растворами соединения **L** из азотнокислых растворов.

Присутствие ионной жидкости **1** в органической фазе существенно изменяет характер зависимости коэффициентов распределения ионов металлов от концентрации HNO_3 в водной фазе (рис. 3). При экстракции растворами **L** в дихлорэтане величины D_U возрастают с симбатно концентрации HNO_3 , что соответствует экстракции ионов металлов по сольватному механизму. Некоторое снижение значения D_{Eu} при $[\text{HNO}_3] > 3$ моль/л связано со снижением концентрации свободного

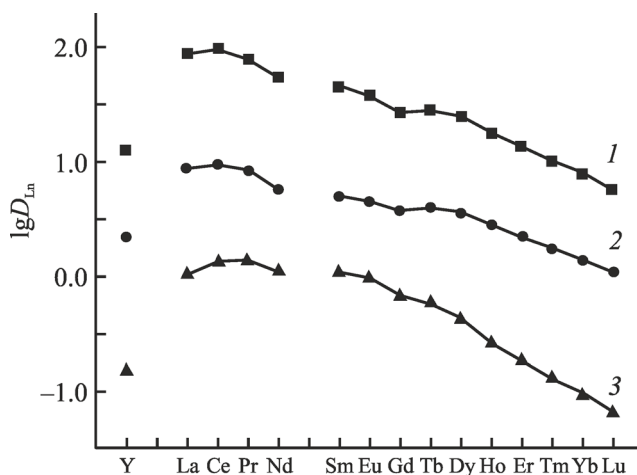
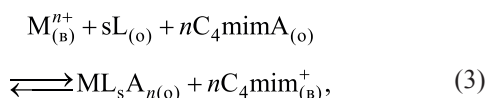


Рис. 4. Коэффициенты распределения Ln(III) и Y(III) при экстракции из 3 М. растворов HNO_3 0.05 М. растворами соединения L в дихлорэтаноле (3) и в дихлорэтаноле, содержащем 0.1 моль/л ионной жидкости 1 (1) и 2 (2).

экстрагента в органической фазе вследствие совместной экстракции азотной кислоты [5]. При экстракции ионов металлов растворами L в присутствии ионной жидкости 1 наблюдается снижение D с увеличением концентрации HNO_3 (рис. 3). Такой же характер зависимости D от $[\text{HNO}_3]$ наблюдался при экстракции Ln(III), U(VI) и Th(IV) смесями L и $\text{C}_4\text{mimTf}_2\text{N}$ в дихлорэтаноле [15]. Это связано с изменением механизма экстракции ионов металлов нейтральными донорно-активными экстрагентами от сольватного к катионообменному в системах с ионными жидкостями (3).



где s – сольватное число.

Величина синергетического эффекта $S = D/(D_L + D_{ИЖ})$ (D_L , D_1 и D – коэффициенты распределения при экстракции индивидуальными лигандом, ионной жидкостью 1 и их смесями соответственно) уменьшается с возрастанием концентрации HNO_3 в водной фазе. При экстракции Eu(III) смесями L и жидкости 1 увеличение концентрации HNO_3 от 0.5 до 5 моль/л сопровождается снижением величины S от 1380 до 16.6.

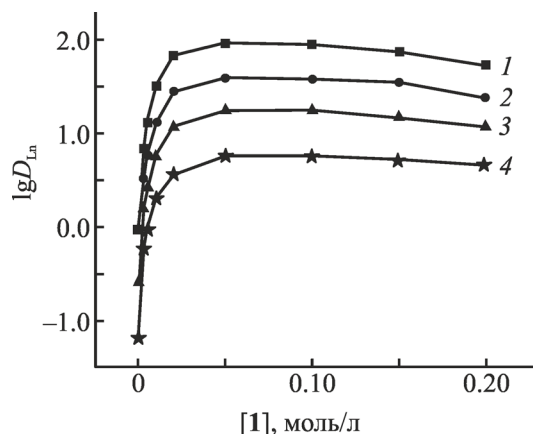


Рис. 5. Зависимость коэффициентов распределения La(III) (1), Eu(III) (2), Ho(III) (3) и Lu(III) (4) от концентрации ионной жидкости 1 в дихлорэтаноле, содержащем 0.05 моль/л L, при экстракции из 3 М. раствора HNO_3 .

Природа аниона ионной жидкости оказывает существенное влияние на эффективность экстракции ионов металлов из азотнокислых растворов смесями L и ионной жидкости. При экстракции Ln(III) раствором L в присутствии более гидрофобной ионной жидкости 1 наблюдается более заметное увеличение коэффициентов распределения Ln(III), чем в системе с жидкостью 2 (рис. 4). В сопоставимых условиях величины S при экстракции Eu(III) составляют 40 и 4.5 в системах с жидкостями 1 и 2 соответственно. При экстракции растворами L, а также смесями L и ионной жидкости 1 из азотнокислых растворов наблюдается тенденция снижения эффективности экстракции Ln(III) с увеличением их атомного номера лантанида (Z) (рис. 4). Это связано с увеличением энергии гидратации ионов Ln^{3+} по мере уменьшения ионных радиусов с возрастанием Z [4].

Увеличение концентрации соединения 1 в органической фазе сопровождается увеличением D_{Ln} (рис. 5). При $[1] > 0.02$ моль/л увеличение концентрации ионной жидкости менее заметно влияет на увеличение D_{Ln} , а при $[1] > 0.1$ моль/л наблюдается некоторое уменьшение D_{Ln} . Подобные зависимости наблюдались ранее при экстракции Ln(III) растворами карбамоилметилфосфиноксидов в при-

сутствии $C_4\text{mimTf}_2\text{N}$ [18]. Одной из причин такого явления может быть сольватация катиона ионной жидкости молекулой нейтрального экстрагента в органической фазе, приводящей к снижению концентрации свободного экстрагента в органической фазе [19].

Стехиометрическое соотношение металл–L в комплексах Ln(III), U(VI) и Th(IV), экстрагируемых в присутствии ионной жидкости **1**, определено методом сдвига равновесия. При постоянной концентрации HNO_3 в водной фазе и ионной жидкости **1** в органической угловой наклон зависимости $\lg D_{Ln} - \lg[L]$ близок к 2 (рис. 6), что указывает на экстракцию ионов Ln(III) из азотнокислых растворов в виде дисольватов. В аналогичных условиях Th(IV) также экстрагируется в форме дисольватов (рис. 6). При экстракции U(VI) угловой наклон зависимости $\lg D_U - \lg[L]$ составляет 1.41 ± 0.12 (R^2 0.998), что указывает на экстракцию U(VI) в виде смеси моно- и дисольватов. Ранее было показано, что в системе $L-C_4\text{mimTf}_2\text{N}$ стехиометрические соотношения U(VI):L и Th(IV):L близки к 1:2, а Ln(III) экстрагируются в виде комплексов состава 1:2 и 1:3 [15]. По-видимому, увеличение сольватных чисел в комплексах Ln(III) и U(VI), экстрагируемых в системе $L-C_4\text{mimTf}_2\text{N}$, связано со слабой координирующей способностью ионов Tf_2N^- [20], которые находятся, по-видимому, во внешней координационной сфере экстрагируемого комплекса. Напротив, диалкилсульфосукцинат-анионы могут участвовать в координации ионов металлов [18].

Представленные данные показали, что эффективность экстракции Ln(III), U(VI) и Th(IV) из азотнокислых растворов растворами дифенил(дибутилкарбамоилметил)фосфиноксида значительно увеличивается в присутствии ионных жидкостей – диалкилсульфосукцинатов 1-бутил-3-метилимидазолия в органической фазе. Увеличение гидрофобности анионов ионных жидкостей сопровождается увеличением эффективности экстракции ионов металлов из азотнокислых растворов. Увеличение гидрофобности диалкилсульфосукцинатов 1-бутил-3-метилимидазолия по сравнению с ионной жидкостью на основе аниона бис[(трифторметил)сульфонил]имида обуславливает существенно меньший переход этих жидкостей в водную фазу при экстракции.

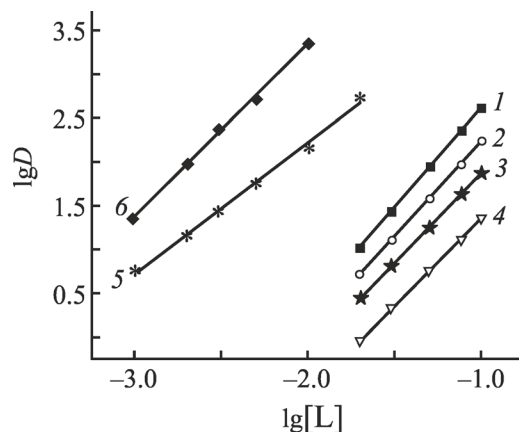


Рис. 6. Зависимость коэффициентов распределения La(III) (1), Eu(III) (2), Ho(III) (3), Lu(III) (4), U(VI) (5) и Th(IV) (6) от концентрации L в дихлорэтане, содержащем 0.1 моль/л ионной жидкости **1**, при экстракции из 3 М раствора HNO_3 .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез дифенил(дибутилкарбамоилметил)фосфиноксида описан ранее [21]. Дигексил- и ди-2-этилгексилсульфосукцинаты 1-бутил-3-метилимидазолия получали при взаимодействии бромида 1-бутил-3-метилимидазолия с дигексил- или ди(2-этилгексил)сульфосукцинатами натрия [22]. В качестве органического растворителя использовали 1,2-дихлорэтан марки ХЧ.

Исходные водные растворы Ln(III), U(VI) и Th(IV) готовили, растворяя соответствующие нитраты в воде, с последующим добавлением HNO_3 . Исходная концентрация ионов металлов 10^{-5} моль/л. Контакт фаз осуществляли в течение 1 ч при комнатной температуре на роторном аппарате, 60 об/мин. Предварительно установлено, что этого времени достаточно для установления постоянных значений коэффициентов распределения элементов в экстракционных системах.

Концентрации Ln(III), U(VI) и Th(IV) в исходных и в равновесных водных растворах определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на масс-спектрометре XSeries II (Thermo Scientific, США). Количество элементов в органической фазе определяли по разнице между концентрациями в водных фазах до и после экстракции. Коэффициенты распределения элементов рассчитывали по отношению их концентраций в равновесных органической и водной

фазах. Погрешность определения коэффициентов распределения не превышала 5%. Концентрацию HNO_3 в равновесной водной фазе измеряли потенциометрическим титрованием раствором NaOH . Концентрацию диалкилсульфосукцинат-ионов в равновесных водных фазах находили атомно-эмиссионным методом с ионизацией пробы в индуктивно связанной плазме на спектрометре IСАР-61 (Thermo Jarrel Ash, США).

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>

Бурмий Жанна Петровна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4195-9392>

Яркевич Алла Николаевна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5668-4534>

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках Государственного задания 2021 г. Института физики твердого тела им. Ю.А. Осипяна РАН, Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН, Института физиологически активных веществ 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., Ustyynyuk 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. *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. *Сафиуллина А.М., Лизунов А.В., Борисова Н.Е., Байлина Т.В., Горюнов Е.И., Горюнова И.Б., Брель В.К.* // *ЖНХ.* 2021. Т. 66. № 5. С. 631; *Safulina A.M., Lizunov A.V., Borisova N.E., Baulina T.V., Goryunov E.I., Goryunova I.B., Brel V.K.* // *Russ. J. Inorg. Chem.* 2021. Vol. 66. N 5. P. 731 P. 414. doi 10.1134/S0036023619030057
7. *Kolarik Z.* // *Solv. Extr. Ion Exch.* 2013. Vol. 31. P. 24. doi 10.1080/07366299.2012.700589
8. *Shkrob I.A., Marin T.W., Jensen M.P.* // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2014. Vol. 53. P. 3641. doi 10.1021/ie4036719
9. *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
10. *Okamura H., Hirayama N.* // *Anal. Sci.* 2021. Vol. 37. P. 119. doi 10.2116/analsci.20SAR11
11. *Белова В.В.* // *Радиохимия.* 2021. Т. 63. С. 3; *Belova V.V.* // *Radiochemistry.* 2021. Vol. 63. P. 1. doi 10.1134/S106636222101001X
12. *Quijada-Maldonado E., Olea F., Supulveda R., Castillo J., Cabezos R., Merlet G., Romero J.* // *Sep. Pur. Technol.* 2020. Vol. 251. 117289. doi 10.1016/j.seppur.2020.117289
13. *Atanassova M.* // *J. Mol. Liq.* 2021. Vol. 343. 117530. doi 10.1016/j.molliq.2021.117530
14. *Sun T., Zhang Y., Wu Q., Chen J., Xia L., Xu C.* // *Solv. Extr. Ion Exch.* 2017. Vol. 35. P. 408. doi 10.1080/07366299.2017.1379142
15. *Туранов А.Н., Карандашев В.К., Яркевич А.Н.* // *Радиохимия.* 2013. Т. 55. № 4. С. 312; *Turanov A.N., Karandashev V.K., Yarkevich A.N.* // *Radiochemistry.* 2013. Vol. 55. N 4. P. 382. doi 10.1134/S1066362213040073
16. *Dib N., Dario Falcone R., Acuna A., Garcia-Rio L.* // *J. Mol. Liq.* 2020. Vol. 304. 112762. doi 10.1016/j.molliq.2020.112762
17. *Turanov A.N., Karandashev V.K., Baulin V.E.* // *Solv. Extr. Ion Exch.* 2008. Vol. 26. P. 77. doi 10.1080/07366290801904871
18. *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
19. *Turanov A.N., Karandashev V.K., Baulin V.E.* // *Solv. Extr. Ion Exch.* 2012. Vol. 30. P. 244. doi 10.1080/07366299.2011.639248
20. *Binnemans K.* // *Chem. Rev.* 2007. Vol. 107. P. 2593. doi 10.1021/cr050979c

21. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Харитонов А.В., Лежнев А.Н., Сафронова З.В., Яркевич А.Н., Цветков Е.Н. // ЖОХ. 1999. Т. 69. Вып. 7. С. 1109; Turanov A.N., Karandashev V.K., Kharitonov A.N., Lezhnev A.N., Safronova Z.V., Yarkevich A.N., Tsvetkov E.N. // Russ. J. Gen. Chem. 1999. Vol. 69. N 7. P. 1068.
22. 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

Effect of Dialkylsulfosuccinate-Based Ionic Liquids on Extraction of Lanthanides(III), Uranium(VI), and Thorium(IV) with Diphenyl(dibutylcarbamoylmethyl)phosphine Oxide from Nitric Acid Solutions

A. N. Turanov^a, V. K. Karandashev^{b,*}, Zh. P. Burmii^b, and A. N. Yarkevich^c

^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, 142432 Russia

^c Institute of Physiologically Active Compounds, Russian Academy of Sciences, 142432 Russia

*e-mail: karan@iptm.ru

Received December 17, 2021; revised January 23, 2022; accepted January 28, 2022

It was found that the extraction of lanthanides(III), uranium(VI) and thorium(IV) ions from nitric acid solutions with solutions of diphenyl(dibutylcarbamoylmethyl)phosphine oxide significantly increases in the presence of ionic liquids, 1-butyl-3-methylimidazolium dialkylsulfosuccinates, in the organic phase. The distribution of the ionic liquid between the organic and aqueous phases is studied depending on the concentration of the ionic liquid and nitric acid. The stoichiometry of the extracted complexes of lanthanides(III), uranium(VI) and thorium(IV) was determined by the slope analysis method. The influence of the length of alkyl radicals in the anionic part of ionic liquid and the concentration of HNO₃ in the aqueous phase on the efficiency of extraction of metal ions into the organic phase containing the ionic liquid is considered.

Keywords: extraction, rare earth elements(III), uranium (VI), thorium (IV), nitric acid, carbamoylmethylphosphine oxides, ionic liquids