

ЭКСТРАКЦИЯ АКТИНИДОВ И ЛАНТАНИДОВ ИЗ АЗОТНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ КОМПЛЕКСАМИ КАРБАМОИЛМЕТИЛФОСФИНОКСИДОВ С БИС[(ТРИФТОРМЕТИЛ)СУЛЬФОНИЛ]ИМИДОМ

© 2023 г. А. Н. Туранов^а, В. К. Карандашев^{б, *}, Г. В. Костикова^б, А. М. Федосеев^б

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

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

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

* e-mail: karan@iptm.ru

Поступила в редакцию 22.07.2022, после доработки 31.08.2022, принята к публикации 05.09.2022

Исследована экстракция U(VI), Th(IV), Am(III) и лантанидов(III) растворами комплексов карбамоилметилфосфиноксидов с фенильными (Ph₂Bu₂) и бутильными (Bu₂Et₂) заместителями при атоме фосфора с бис[(трифторметил)сульфонил]имидом (HTf₂N). Установлено, что ионы актинидов и лантанидов(III) экстрагируются растворами таких комплексов из азотнокислых растворов по катионообменному механизму. При экстракции Ln(III) из растворов 3 моль/л HNO₃ величины D_{Ln} в системе с Ph₂Bu₂-HTf₂N более чем на два порядка выше, чем при экстракции раствором Ph₂Bu₂. Раствор комплекса Ph₂Bu₂-HTf₂N экстрагирует Th(IV), U(VI), Am(III) и Ln(III) из азотнокислых растворов значительно более эффективно, чем Bu₂Et₂-HTf₂N.

Ключевые слова: экстракция, уран(VI), торий(IV), америций(III), лантаниды(III), азотная кислота, карбамоилметилфосфиноксиды, бис[(трифторметил)сульфонил]имид.

DOI: 10.31857/S0033831123010069, **EDN:** ONCICE

Бидентатные нейтральные фосфорорганические соединения, в частности, карбамоилметилфосфиноксиды (КМФО), обладают высокой экстракционной способностью по отношению к актинидам и лантанидам(III) в азотнокислых средах и используются в процессах переработки отработанного ядерного топлива [1–4]. Экстракционная способность этих соединений в азотнокислых средах значительно возрастает в присутствии хлорированного дикарболлида кобальта (ХДК) [5–7] или ионных жидкостей (ИЖ) – бис[(трифторметил)сульфонил]имидов метилалкилимидазолиев (C_nmimTf₂N) [8–14] – в органической фазе или перхлорат-ионов в водной [7, 15].

Процесс катионообменной экстракции ионов актинидов и Ln(III) нейтральными экстрагентами

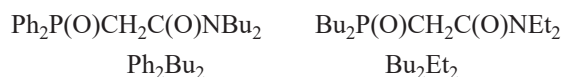
в присутствии C_nmimTf₂N сопровождается переходом катионов C_nmim⁺ в водную фазу [16], что приводит к загрязнению рафинатов экстракционных систем. Снижению таких загрязнений способствует увеличение длины углеводородного радикала катиона C_nmim⁺, однако это приводит к значительному снижению эффективности экстракции ионов металлов в системах с ИЖ [17].

Известно, что КМФО образуют комплексы с сильными кислотами. Комплексы с азотной кислотой эффективно экстрагируют актиниды и лантаниды(III) из азотнокислых растворов в отсутствие органических растворителей [18, 19]. Повышение эффективности экстракции ионов металлов из растворов хлорной кислоты связывают с образованием комплексов КМФО с HClO₄, которые экстрагиру-

ют ионы металлов по катионообменному механизму [7].

Бис[(трифторметил)сульфонил]имид $(CF_3SO_2)_2NH$ (HTf_2N) является сильной кислотой [20] и образует гидрофобные комплексы с рядом нейтральных экстрагентов в процессе экстракции ионов актинидов и $Ln(III)$ из азотнокислых растворов нейтральными экстрагентами в присутствии $C_n\text{mimTf}_2N$ в органической фазе [21]. Представляет интерес рассмотреть возможность использования таких комплексов в качестве экстрагентов для извлечения ионов металлов из азотнокислых растворов, что позволило бы исключить присутствие катионов $C_n\text{mim}^+$ в экстракционных системах.

Цель данной работы – исследование экстракции ионов актинидов и $Ln(III)$ из азотнокислых растворов растворами комплексов КМФО Ph_2Bu_2 и Bu_2Et_2 , отличающимися природой заместителей при атоме фосфора, с HTf_2N в органических растворителях.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

КМФО Ph_2Bu_2 и Bu_2Et_2 синтезированы в Институте физиологически активных веществ РАН по известной методике [22]. Водный раствор HTf_2N готовили путем пропускания раствора литиевой соли бис[(трифторметил)сульфонил]имида ($LiTf_2N$) (Sigma–Aldrich) через колонку катионита КУ-2. Комплексы КМФО– HTf_2N получали взаимодействием растворов КМФО в дихлорэтано с раствором 0.5 моль/л HTf_2N . Органическую фазу отделяли и удаляли органический растворитель в вакууме. Полученные продукты анализировали на содержание фосфора и серы атомно-эмиссионным методом с ионизацией пробы в индуктивно связанной плазме (ICP–AES) с использованием спектрометра iCAP–6500 Duo (Thermo Scientific, США). Соотношение КМФО : HTf_2N составляло 1 : 1 ± 0.1.

Методика проведения экстракции $Ln(III)$, $Am(III)$, $U(VI)$ и $Th(IV)$ описана в предыдущих работах [10–12]. В качестве органических растворителей использовали 1,2-дихлорэтан, нитробензол и *o*-ксилол марки х.ч. Исходная концентрация каждого

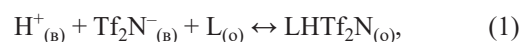
из $Ln(III)$, $U(VI)$ и $Th(IV)$ составляла 2×10^{-6} моль/л, концентрация азотной кислоты в водной фазе варьировалась в интервале 0.3–5.0 моль/л.

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 X-7 (Thermo Electron, США). Содержание элементов в органической фазе определяли по разнице концентраций в водном растворе до и после экстракции. Коэффициенты распределения элементов (D) рассчитывали как отношение их концентраций в равновесных фазах. Погрешность определения D не превышала 10%. Коэффициенты распределения $^{241}Am(III)$ определяли как отношение γ -активности аликвот равновесных органической и водной фазах. Концентрацию HNO_3 в равновесных водных фазах определяли потенциометрическим титрованием раствором $NaOH$.

При исследовании экстракции HTf_2N ее концентрацию в равновесной органической фазе определяли по разнице концентраций H^+ и Tf_2N^- в водном растворе до и после экстракции потенциометрическим титрованием раствором $NaOH$ и методом ICP–AES соответственно. Параллельно определяли содержание HTf_2N в органической фазе при экстракции кислоты чистым дихлорэтаном (холостой опыт). Результаты холостого опыта учитывали при расчете общей концентрации комплексов HTf_2N с экстрагентами в органической фазе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные по распределению HTf_2N между ее водными растворами и растворами КМФО Ph_2Bu_2 и Bu_2Et_2 в дихлорэтано (рис. 1) указывают на то, что в исследованном диапазоне концентрации HTf_2N в органическую фазу переходят комплексы экстрагента (L) с одной молекулой HTf_2N . Процесс экстракции HTf_2N может быть описан уравнением



где символами (в) и (о) обозначены компоненты водной и органической фаз соответственно. Концентрационные константы экстракции HTf_2N (K_{HTf_2N}) выражаются как

$$K_{HTf_2N} = [LH Tf_2N] / ([L][H^+][Tf_2N^-]), \quad (2)$$

где $[L]$ – равновесная концентрация свободного экстрагента в органической фазе. Значения K_{HTf_2N} для КМФО Ph_2Bu_2 и Bu_2Et_2 в дихлорэтано, рассчитанные по данным рис. 1, составляют $(3.35 \pm 0.35) \times 10^3$ и $(1.21 \pm 0.15) \times 10^4$ соответственно. Экстракционная способность исследованных КМФО реагентов по отношению к HTf_2N и устойчивость образуемых комплексов возрастают в ряду $Ph_2Bu_2 < Bu_2Et_2$ по мере снижения электроотрицательности заместителей при атоме фосфора. В такой же последовательности возрастает экстракционная способность этих КМФО по отношению к HNO_3 [23]. Строение комплексов $LHTf_2N$ требует дополнительного изучения. Можно предположить, что они представляют собой ионные пары $LH^+Tf_2N^-$, как комплексы протонированных КМФО или замещенных диоксидов метилendifосфинов с гидрофобными анионами XDK^- и ClO_4^- [24–26].

Исследование влияния концентрации HNO_3 в равновесной водной фазе на эффективность экстракции ионов металлов растворами комплекса $Ph_2Bu_2-HTf_2N$ в дихлорэтано показало, что значения D уменьшаются с ростом $[HNO_3]$ (рис. 1). Такой характер зависимости $D-[HNO_3]$ указывает на катионообменный механизм экстракции ионов металлов растворами $Ph_2Bu_2-HTf_2N$ в дихлорэтано. Из данных рис. 2 видно, что растворы $Ph_2Bu_2-HTf_2N$ в дихлорэтано экстрагируют ионы металлов значительно более эффективно, чем растворы Ph_2Bu_2 в дихлорэтано. При этом отношение $D(Ph_2Bu_2-HTf_2N)/D(Ph_2Bu_2)$ уменьшается с ростом $[HNO_3]$ (рис. 2). Однако даже при экстракции $Ln(III)$

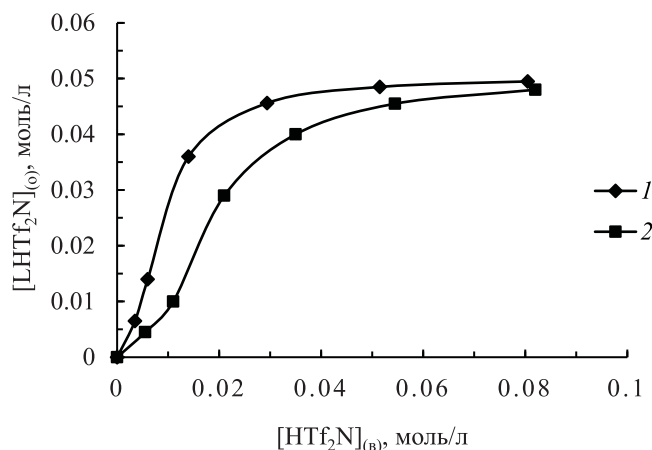


Рис. 1. Экстракция HTf_2N растворами 0.05 моль/л КМФО Bu_2Et_2 (1) и Ph_2Bu_2 (2) в дихлорэтано.

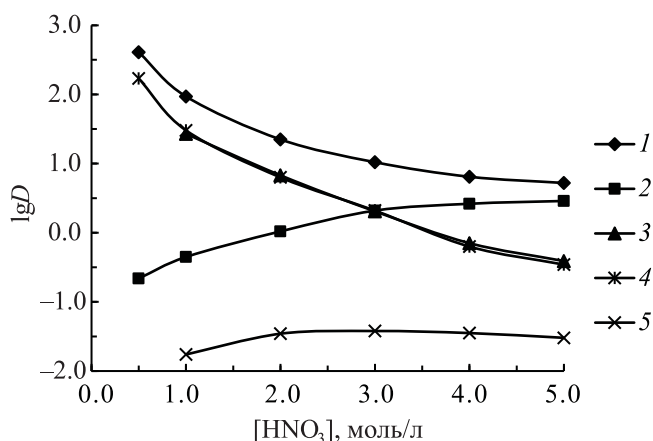


Рис. 2. Зависимость коэффициентов распределения $U(VI)$ (1, 2), $Am(III)$ (3) и $Eu(III)$ (4, 5) от концентрации HNO_3 в водной фазе при экстракции растворами 0.002 (1, 2) и 0.01 (3–5) моль/л КМФО Ph_2Bu_2 (2, 5) и комплекса $Ph_2Bu_2-HTf_2N$ (1, 3, 4) в дихлорэтано.

из растворов 3 моль/л HNO_3 величины D_{Ln} в системе с $Ph_2Bu_2-HTf_2N$ более чем на два порядка выше, чем при экстракции раствором Ph_2Bu_2 (рис. 3). Можно предположить, что это связано с входждением гидрофобных анионов Tf_2N^- в состав экстрагируемых комплексов, что приводит к увеличению их гидрофобности по сравнению с сольватированными нитратами $Ln(III)$, экстрагируемыми растворами КМФО Ph_2Bu_2 в дихлорэтано. При экстракции из раствора 3 моль/л HNO_3 величины $D_{Ln}(Ph_2Bu_2-HTf_2N)/D_{Ln}(Ph_2Bu_2)$ увеличиваются в ряду $Ln(III)$ от 214 для La до 1150 для Lu (рис. 3) по мере уменьшения ионных радиусов ионов Ln^{3+} и увеличения их энергии гидратации. По-видимому, замещение в экстрагируемом комплексе анионов NO_3^- на более гидрофобные Tf_2N^- оказывает большее влияние на экстракцию более гидратированных ионов $Ln(III)$. Это приводит к снижению фактора разделения La/Lu ($\beta_{La/Lu} = D_{La}/D_{Lu}$) от 32.3 при экстракции раствором КМФО Ph_2Bu_2 в дихлорэтано до 2.8 при экстракции комплексом $Ph_2Bu_2-HTf_2N$ (рис. 3). Величины lgD_{Ln} при экстракции $Ln(III)$ из растворов 3 моль/л HNO_3 растворами 0.05 моль/л $Ph_2Bu_2-HTf_2N$ в дихлорэтано сопоставимы с величинами lgD_{Ln} при экстракции раствором, содержащим 0.05 моль/л Ph_2Bu_2 и C_4mimTf_2N [10]. При этом в системе с $Ph_2Bu_2-HTf_2N$ устраняется переход катиона ИЖ в водную фазу.

Эффективность экстракции ионов $Ln(III)$ растворами $Ph_2Bu_2-HTf_2N$ значительно выше, чем

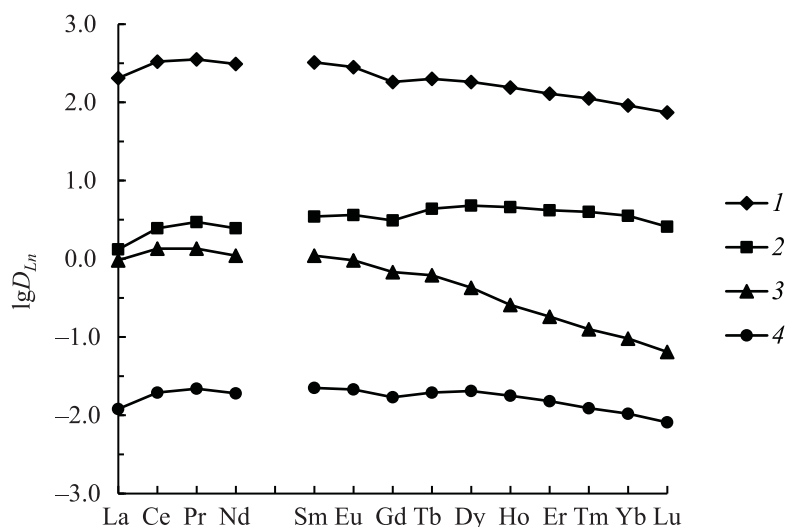


Рис. 3. Коэффициенты распределения Ln(III) при экстракции из раствора 3 моль/л HNO_3 растворами 0.05 моль/л КМФО Ph_2Bu_2 (3), Bu_2Et_2 (4) и комплексов $\text{Ph}_2\text{Bu}_2\text{-HTf}_2\text{N}$ (1) и $\text{Bu}_2\text{Et}_2\text{-HTf}_2\text{N}$ (2) в дихлорэтано.

$\text{Bu}_2\text{Et}_2\text{-HTf}_2\text{N}$ (рис. 3), что связано с проявлением эффекта «аномального арильного упрочнения» экстрагируемых комплексов [27].

Методом сдвига равновесия определены стехиометрические соотношения $\text{M}^{n+} : \text{L}$ в комплексах, экстрагируемых растворами $\text{Ph}_2\text{Bu}_2\text{-HTf}_2\text{N}$ и $\text{Bu}_2\text{Et}_2\text{-HTf}_2\text{N}$ из растворов 3 моль/л HNO_3 . При экстракции Am(III), Ln(III) и Th(IV) угловой наклон зависимостей $\lg D - \lg[\text{LHTf}_2\text{N}]$ близок к 3 (рис. 4), что соответствует переходу этих ионов в органическую фазу в виде трисольватов. Угловой наклон зависимостей $\lg D_{\text{U}} - \lg[\text{LHTf}_2\text{N}]$ близок к 2 (рис. 4), что указывает на экстракцию ионов U(VI) из азотнокислых растворов в дисольватов. Ранее было показано, что КМФО Ph_2Bu_2 экстрагирует U(VI) из азотнокислых растворов в виде смеси моно- и дисольватов [28], а Am(III) и Ln(III) – в основном в виде дисольватов [23, 29]. Увеличение сольватного числа в комплексах, экстрагируемых в системах с LHTf_2N , может быть связано со слабой координационной способностью анионов Tf_2N^- [30]. Эти анионы находятся, по-видимому, во внешней координационной сфере экстрагируемого комплекса, тогда как в системах с КМФО ионы U(VI) и Ln(III) экстрагируются в виде координационно-сольватированных нитратов, в которых ионы NO_3^- участвуют в координации ионов UO_2^{2+} и Ln^{3+} [31].

При постоянной кислотности водной фазы (0.5 М HNO_3) увеличение концентрации ионов NO_3^- , вводимых в виде NH_4NO_3 , до 4 моль/л не приводит

к заметному изменению D_{Ln} в процессе экстракции растворами $\text{Ph}_2\text{Bu}_2\text{-HTf}_2\text{N}$ и $\text{Bu}_2\text{Et}_2\text{-HTf}_2\text{N}$. Можно предположить, что ионы NO_3^- не участвуют в образовании экстрагируемых комплексов в этих условиях.

Следует отметить, что растворы $\text{Ph}_2\text{Bu}_2\text{-HTf}_2\text{N}$ эффективно экстрагируют ионы Ln(III) из растворов других минеральных кислот. При экстракции раствором 0.03 моль/л $\text{Ph}_2\text{Bu}_2\text{-HTf}_2\text{N}$ в дихлорэтано из растворов 3 моль/л H_3PO_4 , HCl , H_2SO_4 и HNO_3 величины $\lg D_{\text{Eu}}$ составляют 3.17, 2.43, 2.30 и 1.95, соответственно.

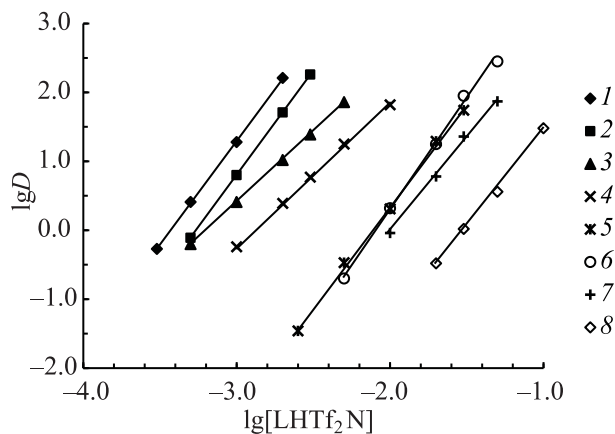


Рис. 4. Зависимость коэффициентов распределения Th(IV) (1, 2), U(VI) (3, 4), Am(III) (5) и Eu(III) (6–8) от концентрации комплексов $\text{Ph}_2\text{Bu}_2\text{-HTf}_2\text{N}$ (1, 3, 5–7) и $\text{Bu}_2\text{Et}_2\text{-HTf}_2\text{N}$ (2, 4, 8) в дихлорэтано при экстракции из раствора 3 моль/л HNO_3 .

Экстракция ионов Am(III) и Ln(III) из азотно-кислых растворов растворами LHTf₂N может быть описана уравнением



а константа катионообменной экстракции может быть выражена как

$$K_{ex} = D_M[LHTf_2N]^3[H^+]^{-3}. \quad (3)$$

Ранее было показано, что комплексы Ln(III) такой же стехиометрии экстрагируются растворами КМФО в дихлорэтаноле из растворов, содержащих ионы Tf₂N⁻ [32]. При этом устойчивость комплексов LnL₃(Tf₂N)₃ определяется величиной константы экстракции в такой системе

$$K_{ex}^1 = D_{Ln}[Tf_2N^-]^3[L]^{-3}. \quad (4)$$

Взаимосвязь между K_{ex} и K_{ex}^1 может быть выражена как

$$K_{ex} = K_{ex}^1 K_{HTf_2N}^{-3}. \quad (5)$$

Из этого выражения следует, что эффективность экстракции ионов металлов растворами комплексов LHTf₂N возрастает с увеличением устойчивости комплексов LnL₃(Tf₂N)₃ и снижается с увеличением устойчивости LHTf₂N. Большое различие между величинами D_{Ln} при экстракции растворами комплексов Ph₂Bu₂-HTf₂N и Bu₂Et₂-HTf₂N из растворов 3 моль/л HNO₃ (рис. 3) связано в большей степени не с различием в устойчивости комплексов LnL₃(Tf₂N)₃ в системах с Ph₂Bu₂ и Bu₂Et₂ [32], а с более высокой устойчивостью комплекса Bu₂Et₂-HTf₂N:

$$\begin{aligned} D_{Ln}(Ph_2Bu_2-HTf_2N)/D_{Ln}(Bu_2Et_2-HTf_2N) = \\ = [K_{ex}(Ph_2Bu_2)/K_{ex}(Bu_2Et_2)][K_{HTf_2N}(Bu_2Et_2)/ \\ /K_{HTf_2N}(Ph_2Bu_2)]^3. \end{aligned} \quad (6)$$

Природа органического растворителя существенно влияет на экстракцию ионов металлов растворами LHTf₂N. При экстракции растворами 0.01 моль/л Ph₂Bu₂-HTf₂N из растворов 3 моль/л HNO₃ значения lgD_{Eu} возрастают ряду о-ксилол (-0.02) < дихлорэтан (0.32) < нитробензол (2.13) по мере увеличения полярности органического растворителя.

Представленные данные показали, что ионы актинидов и лантанидов(III) экстрагируются растворами комплексов КМФО с HTf₂N из азотнокислых

растворов по катионообменному механизму. При экстракции Ln(III) из растворов 3 моль/л HNO₃ значения D_{Ln} в системе с Ph₂Bu₂-HTf₂N более чем на два порядка выше, чем при экстракции раствором Ph₂Bu₂. Комплекс на основе КМФО с фенильными заместителями при фосфорильной группе экстрагирует Th(IV), U(VI), Am(III) и Ln(III) из азотнокислых растворов значительно более эффективно, чем на основе его бутилзамещенного аналога.

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках Государственного задания 2022 г. ИФТТ РАН, ИПТМ РАН и ИФХЭ 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. <https://doi.org/10.10016/j.mencom.2015.09.001>
2. *Horwitz E.P., Martin K.A., Diamond H., Kaplan L.* // Solvent Extr. Ion Exch. 1986. Vol. 4, N 3. P. 449. <https://doi.org/10.1080/07366298608917877>
3. *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.
4. *Аляпышев М.Ю., Бабаин В.А., Устынюк Ю.А.* // Успехи химии. 2016. Т. 85, № 9. С. 943–961; *Alyapyshev M Yu., Babain V.A., Ustyniuk Yu.A.* // Russ. Chem. Rev. 2016. Vol. 85, N 9. P. 943. <https://doi.org/10.1070/RCR4588>
5. *Romanovskiy V.N., Smirnov V.I., Babain V.A., Todd T.A., Herbst R.S., Law J.D., Brewer K.N.* // Solvent Extr. Ion Exch. 2001. Vol. 19, N 1. P. 1.
6. *Rais J., Tachimori S.* // J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett. 1994. Vol. 188, N 2. P. 157.
7. *Смирнов И.В.* // Радиохимия. 2007. Т. 49, № 1. С. 40.
8. *Белова В.В.* // Радиохимия. 2021. Т. 63. С. 3; *Belova V.V.* // Radiochemistry. 2021. V. 63. P. 1. <https://doi.org/10.1134/S106636222101001X>
9. *Atanassova M.* // J. Mol. Liq. 2021. Vol. 343. 117530. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117530>

10. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Яркевич А.Н. // Радиохимия. 2013. Т. 55, № 4. С. 314; Turanov, A.N., Karandashev, V.K., Yarkevich, A.N. // Radiochemistry. 2013. Vol. 55, N 4. P. 382. <https://doi.org/10.1134/S1066362213040073>
11. Туранов А.Н., Карандашев В.К., Яркевич А.Н. // Радиохимия. 2022. Т. 64, № 2. С. 164; Turanov, A.N., Karandashev, V.K., Yarkevich, A.N. // Radiochemistry. 2022. Vol. 64, N 2. P. 163. <https://doi.org/10.1134/S1066362222020072>
12. Turanov A.N., Karandashev V.K., Sharova E.V., Genkina G.K., Artyushin O.I., Baimukhanova A. // Radiochim. Acta. 2018. Vol. 106. P. 355.
13. Прибылова Г.А., Смирнов И.В., Новиков А.П. // Радиохимия. 2012. Т. 54, № 5. С. 435.
14. Pribilova G., Smirnov I., Novikov A. // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2012. Vol. 295. P. 83.
15. Chmutova M.K., Litvina M.N., Nesterova N.P., Myasoevov B.F., Kabachnik M.I. // Solvent Extr. Ion Exch. 1992. Vol. 10. P. 439.
16. Gaillard C., Boltoeva M., Billard I., Georg S., Mazan V., Ouadi A., Ternova D., Henning C. // ChemPhysChem. 2015. Vol. 16. P. 2653. <https://doi.org/10.1002/cphc.201500283>
17. Sun T., Zhang Y., Wu Q., Chen J., Xia L., Xu C. // Solvent Extr. Ion Exch. 2017. Vol. 35. P. 408. <https://doi.org/10.1080/07366299.2017.1379142>.
18. Чмутова М.К., Куляко Ю.М., Литвина М.Н., Маликов Д.А., Мясоедов Б.Ф. // Радиохимия. 1998. Т. 40, № 3. С. 241.
19. Куляко Ю.М., Самсонов М.Д., Литвина М.Н., Чмутова М.К., Мясоедов Б.Ф. // Радиохимия. 2002. Т. 44, № 3. С. 235.
20. Katsuta S., Watanabe Y., Araki Y., Kudo Y. // ACS Sust. Chem. Eng. 2016. Vol. 4. P. 564.
21. Turanov A.N., Karandashev V.K., Baulin V.E. // Solvent Extr. Ion Exch. 2012. Vol. 30, N 3. P. 244. <https://doi.org/10.1080/07366299.2011.639248>
22. 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, № 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.
23. Чмутова М.К., Иванова Л.А., Кочеткова Н.Е., Нестерова Н.П., Мясоедов Б.Ф., Розен А.М. // Радиохимия. 1995. Т. 37, № 5. С. 422.
24. Стоянов Е.С., Воробьева Т.П., Смирнов И.В. // ЖСХ. 2003. Т. 44, № 3. С. 414.
25. Stoyanov E.S., Smirnov I.V., Fedotov M.A. // J. Phys. Chem. A. 2006. Vol. 110. P. 9505.
26. Stoyanov E.S., Smirnov I.V. // J. Mol. Struct. 2005. Vol. 740. P. 9.
27. Розен А.М., Крупнов Б. В. // Успехи химии. 1996. Т.65, № 11. С. 1052–1079; Rozen A.M., Krupnov B.V. // Russ. Chem. Rev. 1996. Vol. 65, N 11. P. 973. <http://dx.doi.org/10.1070/RC1996v065n11ABEH000241>
28. 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.
29. Литвина М.Н., Чмутова М.К., Мясоедов Б.Ф., Кабачник М.И. // Радиохимия. 1996. Т. 38, № 6. С. 525.
30. Binnetans K. // Chem. Rev. 2007. Vol. 107. P. 2593. <https://doi.org/10.1021/cr050979c>
31. Шарова Е.В., Артюшин О.И., Нелюбина Ю.В., Лысенко К.А., Пасечник М.П., Одинец И. Л. // Изв. АН. Сер. хим. 2008. N 9. С. 1856.
32. 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. 170–176. <https://doi.org/10.1134/S1066362218020078>