

УДК 541.61

EDN ULIBMG

Экстракционное выделение трехвалентных *f*-элементов из высокоактивных отходов с применением производных (2-карбамоилэтил) дифенилфосфиноксидов

**А.М. Сафиулина^{1,2*}, А.В. Лизунов¹, Е.И. Горюнов³, В.К. Брель³,
Г.В. Костинова⁴, В.И. Жилов⁴, И.Г. Тананаев⁵**

¹Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара, Москва,

²Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва

³Институт элементоорганических соединений им. А.Н. Несмеянова РАН, Москва

⁴Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва

⁵Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева КНЦ РАН, Апатиты

*AMSafiulina@bochvar.ru

Исследована экстракция *f*-элементов из модельных растворов высокоактивных отходов (ВАО) с целью выявления возможности группового разделения лантанидов и прочих компонентов этих отходов в экстракционном процессе с использованием ряда (2-карбамоилэтил) дифенилфосфиноксидов (КЭФО). В результате показано, что соединения класса КЭФО селективно и эффективно экстрагируют трехвалентные катионы лантанидов в азотнокислотных средах. Фактор разделения в паре сумма Ln^{3+} / сумма катионов солевого фона модельного раствора ВАО достигает $6 \cdot 10^4$ для соединений III – IV, в то время как для соединений I и V он оказывается существенно меньшим – около 200. Реэкстракция суммы Ln^{3+} из насыщенной органической фазы происходит количественно с использованием раствора карбоната натрия, в отличие от водной реэкстракции.

Ключевые слова: экстракция, актиниды, лантаниды, фосфорорганические соединения, карбамоилфосфиноксиды, (2-карбамоилэтил) дифенилфосфиноксиды

Extraction of trivalent *f*-elements from high-level waste using (2-carbamoylethyl) diphenylphosphine oxides derivatives

**A.M. Safiulina^{1,2*}, A.V. Lizunov¹, E.I. Goryunov³, V.K. Brel³, G.V. Kostikova⁴,
V.I. Zhilov⁴, I.G. Tananaev⁵**

¹ JSC «A. A. Bochvar High-tech Research Institute of Inorganic Materials», Moscow

²D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow

³A.N. Nesmeyanov Institute of organoelement compounds of Russian Academy of Science, Moscow

⁴Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry Russian Academy of Sciences, Moscow

⁵Tananaev Institute of Chemistry - Federal Research Centre «Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences», Apatity

*AMSafiulina@bochvar.ru

Extraction of *f*-elements from model solutions of high-level waste (HLW) was studied in order to identify the possibility of group separation of lanthanides and other components of this waste in the extraction process using a series of (2-carbamoylethyl) diphenylphosphine oxides (CEPO). As a result, it was shown that CEPO class compounds extract trivalent lanthanide cations in nitric acid media selectively and effectively. The separation factor in the pair of sum Ln^{3+} /sum of the salt background cations of the model solution of HLW reaches $6 \cdot 10^4$ for compounds III – IV, while for compounds I and V it turns out to be significantly smaller – about 200. Re-extraction of Ln^{3+} sum from the saturated organic phase occurs quantitatively using a sodium carbonate solution in contrast to aqueous reextraction.

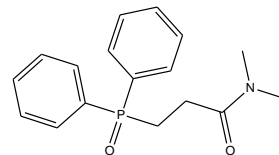
Key words: extraction, actinides, lanthanides, organophosphorus compounds, carbamoylphosphine oxides, (2-carbamoylethyl) diphenylphosphine oxides

Введение

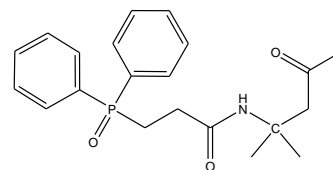
Стратегия переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) включает извлечение из ОЯТ урана и плутония, которые могут быть использованы в качестве топлива, а также радиоактивных изотопов для различных целей. Переработка ОЯТ позволяет уменьшить объем радиоактивных отходов и извлекать ценные ресурсы, в том числе и для использования в реакторах на быстрых нейтронах, которые могут производить больше топлива, чем потребляют [1-3]. В целом, переработка ОЯТ является сложным, но важным направлением в ядерной энергетике, позволяющим извлекать ценные ресурсы и сокращать объемы радиоактивных отходов. Большинство вариантов фракционирования ВАО в настоящее время рассматривают как сопряженный или пересекающийся с основным репроцессингом этап переработки ОЯТ с выделением минорных актинидов (америция, кюрия и нептуния) и осколочных радионуклидов, в частности *f*-элементов [4, 5].

Анализ многолетних систематических исследований в сфере экстракции актинидов и лантанидов указывает на то, что элементоорганические соединения с координирующей фосфорильной группировкой, используемые в качестве экстрагентов, являются наиболее эффективными для выделения этих *f*-элементов [6-11]. Бидентатные нейтральные фосфорорганические соединения (БНФОС), содержащие карбамоильную группировку $[-C(O)-N <]$, оказались более перспективными в технологии разделения *f*-элементов как из-за более простого синтеза, так и из-за лучшей совместимости данных лигандов и их комплексов с доступными органическими растворителями. Вместе с тем селективность большинства простейших соединений этого класса, относящихся к типу карбамоилметилфосфиноксидов (КМФО), при разделении актинидов и лантанидов оказывается недостаточной [12-15].

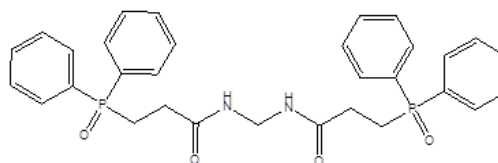
Ранее в работе [16] были исследованы экстракционные свойства потенциально наиболее интересных ближайших гомологов КМФО, а именно производных (2-карбамоилэтил) дифенилфосфиноксидов (КЭФО) (I-V) по отношению к актинидам и лантанидам из азотокислых сред.



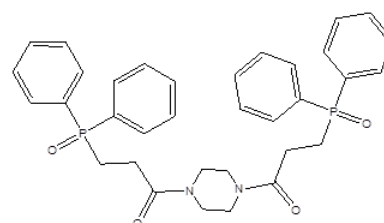
I [2 - (N, N-диметилкарбамоил) этил] дифенилфосфиноксид



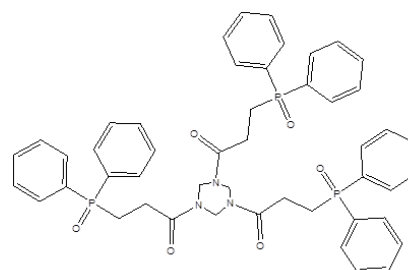
II -[2-[N-(1,1-диметил-3-оксобутил) карбамоил]этил]дифенилфосфиноксид



III – N, N'-метиленбис [3 - (дифенилфосфорил) пропионамид]



IV - N,N'-бис [3 - (дифенилфосфорил) пропионил] пиперазин



V - N,N',N''-трис [3 - (дифенилфосфорил) пропионил] - 1,3,5 - триазациклогексан

В работе была исследована экстракция катионов La(III), Ce(III), Nd(III), Eu(III), Ho(III), Tb(III), Er(III), U(VI) и Th(IV) из азотнокислых сред с варьированием концентрации HNO_3 от 0,1 до 5,5 моль/л; в качестве экстрагентов были использованы растворы соединений I-V в хлороформе с концентрацией 0,01 моль/л. Было показано, что наибольшей эффективностью при экстракции актинидов обладает N,N'-метиленис[3-(дифенилфосфорил)пропионамид] (III), в котором два дифенилфосфорилпропионильных радикала связаны жёстким – HNCH_2NH -линкером (степень извлечения U(VI) достигает ~73 %, а Th(IV) – ~85%), в то время как в случае лантанидов, напротив, существенное преимущество имеет лиганд (V), содержащий максимальное количество фосфорилкарбонильных радикалов, присоединённых к конформационно нежёсткой азотистой гетероциклической матрице, а также КЭФО (II), включающий дополнительную С=О-группу (при использовании этого соединения экстракция гадолиния близка к 92%) [16].

На основании ранее полученных данных [16] представлялось целесообразным исследование экстракции *f*-элементов из модельных растворов ВАО с целью выявления возможности селективного отделения лантанидов от компонентов солевого фона ВАО и актинидов в экстракционном процессе с использованием лигандов (I–V) класса КЭФО, что и было выполнено в настоящей работе.

Экспериментальная часть

В работе использовали в качестве экстрагентов производные (2-карбамоилэтил) дифенилфосфиноксидов (I–V), синтезированные по методике [16]. В качестве растворителя применяли хлороформ (х.ч.). В работе использовали ГСО 8363-2003 закись-окись урана, аттестованного на содержание урана $84,784 \pm 0,016\%$, соли нитратов лантанидов и тория $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Pr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{d}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Eu}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Gd}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Tb}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ho}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{Er}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{Yb}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ марки х.ч. Растворы готовили объемно-весовым методом в бидистиллированной воде, растворы нитратов исследуемых элементов готовили растворением навески соответствующего нитрата в 0,01 моль/л растворе HNO_3 на базе HNO_3 (ос.ч.). Для проведения экспериментов по экстракции *f*-элементов использовали модельный раствор, имитирующий состав высокоактивных отходов [17]. Для приготовления модельного

раствора (рис. 1, а) применяли имитаторы продуктов деления и коррозии в форме нитратов Na, K, Cs, Mg, Sr, Ca, Ba, Al, Zr, Fe, Pb, Cr, Mn, Ni. Молибден вводили в виде полимолибдата аммония $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Нитрат циркония $\text{Zr}(\text{NO}_3)_4$ готовили кипячением в течение 72 ч $\text{ZrO}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ в концентрированной азотной кислоте с обратным холодильником с последующим отделением нерастворившегося осадка. В модельный раствор вводили подготовленную смесь нитратов *f*-элементов в растворе 4,68 моль/л азотной кислоты (рис. 1, б). Концентрации катионов лантанидов, актинидов и других металлов в азотнокислых растворах после предварительной пробоподготовки определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС-ИСП) на приборе Agilent 7500ce («Agilent Technologies» США) с прослеживаемостью к государственным стандартам. Концентрацию растворов HNO_3 определяли потенциометрическим титрованием 0,1 моль/л NaOH с использованием pH-метра / кондуктометра S470 Seven Excellence™ (Mettler Toledo) с точностью $\pm 0,01$ ед. pH, при этом концентрацию раствора NaOH уточняли аттестованным раствором (фиксаналом).

Исследование экстракции катионов металлов проводили в стеклянных пробирках с притертыми пробками в отношении объемов фаз 1 : 1 при температуре 20 ± 1 °С. Фазы перемешивали в течение 20 мин в ротаторе со скоростью перемешивания 80 об./мин. Время установления равновесия экстракции проверяли, увеличивая время контакта фаз до 120 мин; коэффициенты распределения при этом не изменялись. Расслаивание фаз осуществляли центрифугированием. После разделения фаз концентрацию катионов металлов в равновесной водной фазе определяли масс-спектрометрическим методом. Для всех случаев проводили не менее пяти независимых опытов. Суммарная погрешность полученных результатов составляла ~20%, учитывая не исключенную и случайную составляющие. Доверительный интервал определяемых концентраций металлов в эксперименте составлял 0,002 ммоль/л. Коэффициенты распределения при экстракции ($D = [\text{M}]_{\text{орг}}/[\text{M}]_{\text{в}}$) определяли при постоянной концентрации экстрагента (0,1 моль/л в хлороформе). Групповые коэффициенты распределения лантанидов и компонентов солевого фона рассчитывали по уравнению $D = (\sum_{i=1}^N C_{Me_i^{n+}})_{\text{орг}} / (\sum_{i=1}^N C_{Me_i^{n+}})_{\text{водн}}$, при этом учитывали постоянство объема равновесных фаз.

Коэффициенты разделения в паре сумма Ln^{3+} /сумма катионов солевого фона модельного раствора ВАО рассчитывали как отношение коэффициентов распределения ($\alpha = D_{\Sigma\text{Ln}^{3+}}/D_{\Sigma\text{КСФ}}$) суммы лантанидов и суммы катионов солевого фона.

Результаты и обсуждение

При исследовании экстракционной способности соединений I-V в отношении f -элементов в модельных растворах ВАО на всех стадиях оценивали влияние других компонентов, имитирующих состав отходов. При экстракции целевых f -элементов ионы металлов, представленные на рис. 1(а), практически не сольватировались в фазу, содержащую органический лиганд. Поэтому при использовании производных КЭФО наблюдается селективное выделение лантанидов в раствор I-V в хлороформе и эффективность экстракции Ln^{3+} основывается исключительно на строении лиганда. Однако необходимо отметить, что все соединения I-V в представленных условиях эксперимента проявляют высокую экстракционную способность для целевых катионов лантанидов [рис. 2 (а)-(д)] со степенями извлечения от 80 до ~ 100 %. В то же время актиниды, в нашем случае U(VI) и Th(IV), экстрагируются в фазу лиганда значительно хуже в сравнении с Ln^{3+} со степенями извлечения от 1 до 65 %.

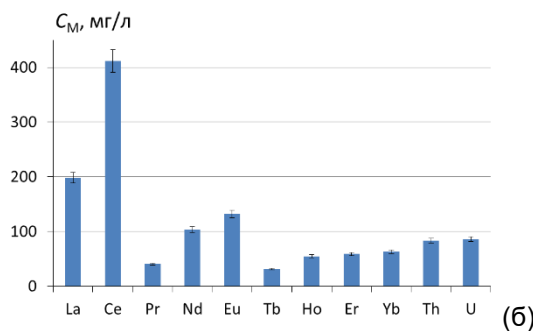
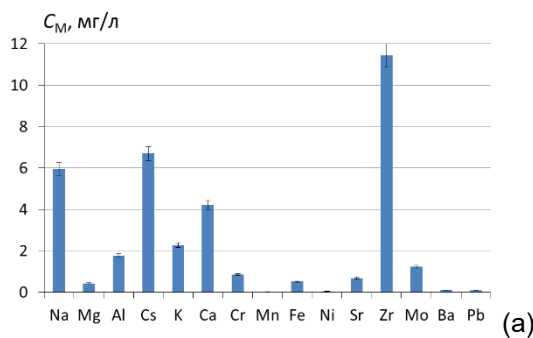


Рис.1. Содержание элементов в модельном растворе, имитирующем состав высокоактивных отходов (а) и f -элементов (б) (4,68 моль/л HNO_3).

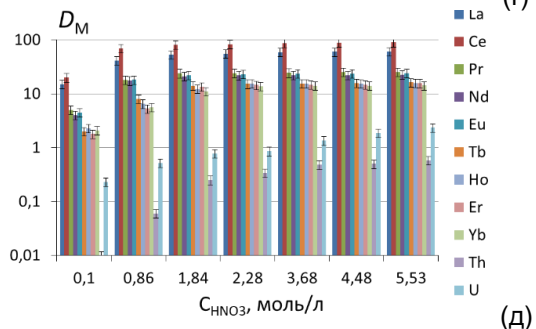
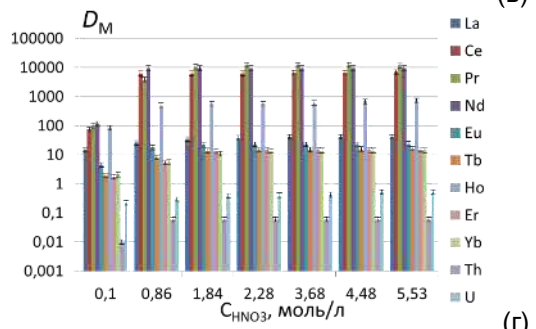
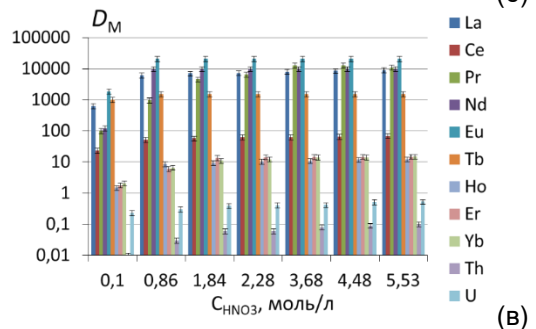
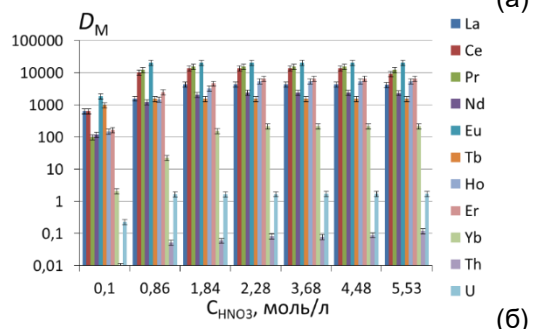
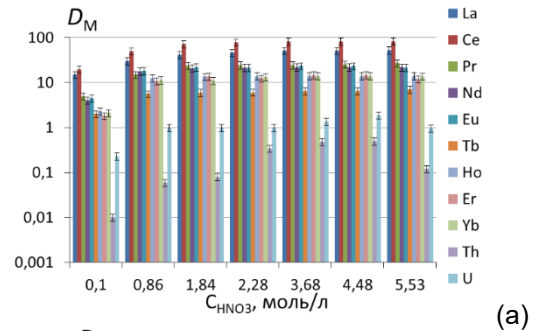


Рис. 2. Экстракция актинидов и лантанидов из модельных растворов, имитирующих состав ВАО, производными КЭФО I (а), II (б), III (в), IV (г) и V (д) (0,1 моль/л в CHCl_3 , O: B = 1: 1) при варьировании концентрации азотной кислоты от 0,1 до 5,53 моль/л

Несмотря на высокую эффективность экстракции лантанидов, факторы их разделения от суммы катионов солевого фона модельного раствора ВАО существенно зависят от строения лиганда. В отличие от соединения I, содержащего одну карбонильную и одну фосфорильную группы, соединенные этильным линкером, лиганд II с дополнительным координирующим центром - второй карбонильной группировкой, а также соединения III и IV, обладающие двумя фосфорильными и двумя карбонильными группами, характеризуются существенно более высокой эффективностью разделения в паре суммы Ln^{3+} от суммы катионов солевого фона модельного раствора ВАО (таблица 1).

Таблица 1.
Значения коэффициентов разделения в паре сумма Ln^{3+} /сумма катионов солевого фона модельного раствора ВАО при концентрации азотной кислоты 4,48 моль/л.

	I	II	III	IV	V
α	240	60000	50000	30000	270

Однако для соединения V, в котором имеется три фосфорильные и три карбонильные группировки, коэффициент разделения снижается практически до уровня соединения I, что можно объяснить стерическими затруднениями при комплексообразовании.

Необходимо отметить, что актиниды (на примере урана и тория) экстрагируются в условиях представленного эксперимента незначительно: степень извлечения не превышает ~ 65%, что, скорее всего, обусловлено конкуренцией с лантанидами за вакантные координирующие центры.

Из насыщенной органической фазы лантаниды реэкстрагировали водой и 0,5 моль/л водным раствором Na_2CO_3 . Эффективность реэкстракции лантанидов водой не превышает ~ 70%, в то время как при реэкстракции раствором карбоната натрия лантаниды извлекаются из насыщенной органической фазы практически полностью.

Выводы

1. Соединения класса КЭФО эффективно экстрагируют трехвалентные катионы лантанидов в азотнокислотных средах, при этом эффективность их экстракции возрастает с ростом концентрации азотной кислоты. Эффективность экстракции актинидов в тех же условиях существенно ниже – степень их извлечения не превышает 65 %

2. Фактор разделения в паре сумма Ln^{3+} /сумма катионов солевого фона модельного раствора ВАО достигает 50 000 – 60 000 для соединений II – III, в то время как для КЭФО I и V он оказывается существенно меньшим – около 200, что объясняется оптимальным количеством центров координации у первых двух лигандов.

Реэкстракция суммы Ln^{3+} из насыщенной органической фазы происходит практически количественно с использованием раствора карбоната натрия, в то время как водная реэкстракция оказывается существенно менее эффективной.

Работа выполнялась при поддержке КНП №075-15-2024-534, а также для ИНЭОС РАН в рамках Государственного задания № 075-00276-25-00 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Список литературы

1. Адамов Е.О., Мочалов Ю.С., Рачков В.И., Хомяков Ю.С., Шадрин А.Ю., Кащеев В.А., Хаперская А.В. Переработка отработавшего ядерного топлива и рециклирование ядерных материалов в двухкомпонентной ядерной энергетике. // *Атомная энергия*. 2021. Т. 130. Вып. 1. С. 28-34. (Adamov E.O., Mochalov Y.S., Rachkov V.I., Khomyakov Y.S., Shadrin A.Y., Kascheev V.A., Khaperskaya A.V. Spent nuclear fuel reprocessing and nuclear materials recycling in two-component nuclear energy. // *Atomic Energy*. 2021. Vol. 130. № 1. P. 29-35. <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00769-w>)
2. Адамов Е.О., Джалавян А.В., Лопаткин А.В., Молоканов Н.А., Муравьев Е.В., Орлов В.В., Калякин С.Г., Рачков В.И., Троянов В.М., Аврорин Е.Н., Иванов В.Б., Алексахин Р.М. Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетике России в перспективе до 2100 г. // *Атомная энергия*. 2012. Т. 112. № 6. С. 319-330. (Adamov E.O., Dzhalyavan A.V., Lopatkin A.V., Molokanov N.A., Muravyov E.V., Orlov V.V., Kal'akin S.G., Rachkov V.I., Troyanov V.M., Avrorin E.N., Ivanov V.B., Aleksakhin R.M. Conceptual framework of a strategy for the development of nuclear power in Russia to 2100. // *Atomic Energy*. 2012. Vol. 112. № 6. P. 391-403. <https://doi.org/10.1007/s10512-012-9574-x>).

3. Gutorova S.V., Logunov M.V., Voroshilov Y.A., Babain V.A., Shadrin A.Yu., Podoynitsyn S.V., Kharitonov O.V., Firsova L.A., Kozlitiin E.A., Ustynyuk Yu.A., Lempert P.S., Nenajdenko V.G., Voronina A.V., Volkovich V.A., Polovov I.B., Dvoeglazov K.N., Mochalov Yu.S., Vidanov V.L., Kascheev V.A., Zaikov Yu.P., Kovrov V.A., Holkina A.S., Suntsov D.Yu., Filimonova E.D., Shmidt O.V., Volk V.I., Melentev A.B., Korchenkin K.K., German K.E., Pokhiltonov Yu.A., Tananaev I.G., Pavlyukevich E.Yu., Bagautdinova O.A., Alekseenko V.N., Podrezova L.N., Milyutin V.V., Nekrasova N.A., Kaptakov V.O., Tkachenko L.I., Kalmykov S.N. *Modern Trends in Spent Nuclear Fuel Reprocessing and Waste Fractionation*. // *Russ Journal of General Chemistry*. 2024. Vol. 94 (Suppl 2). P. S243–S430. <https://doi.org/10.1134/S1070363224150015>
4. *Status of Developments in the Back End of the Fast Reactor Fuel Cycle*. IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-4.2. IAEA, Vienna, 2011. 91 p.
5. Кащеев В.А., Логунов М.В., Шадрин А.Ю., Рыкунова А.А., Шмидт О.В. Стратегия фракционирования ВАО от переработки ОЯТ // *Радиоактивные отходы*. 2022. № 2 (19). С. 6-16. (Kashcheev V.A., Logunov M.V., Shadrin A.Yu., Rykunova A.A., Schmidt O.V. Strategy for the fractionation of HLW from SNF reprocessing. // *Radioactive Waste*. 2022. № 2(19). P. 6-16. <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2022-2-6-16>).
6. Тананаев И.Г., Мясоедов Б.Ф. Методы и подходы к технологическому выделению ценных радионуклидов из отработавшего ядерного топлива // *Радиохимия*. 2016. Т. 58. № 3. С. 222-228. (Tananaev I.G., Myasoedov B.F. Commercial recovery of valuable radionuclides from spent nuclear fuel: methods and approaches // *Radiochemistry*. 2016. V. 58. № 3. P. 257-264. <https://doi.org/10.1134/S1066362216030061>)
7. Serrano-Purroy D., Baron P., Christiansen B., Glatz J.-P., Madic Ch., Malmbeck R., Modolo G. First demonstration of a centrifugal solvent extraction process for minor actinides from a concentrated spent fuel solution. // *Separation and Purification Technology*. 2005. Vol. 45. № 2. P. 157-162. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2005.03.001>.
8. Dam H.H., Reinhoudt D.N., Verboom W. Multicoordinate ligands for actinide/lanthanide separations. // *Chem. Soc. Rev*. 2007. Vol. 36. P. 367-377. <https://doi.org/10.1039/B603847F>
9. Кабачник М.И., Медведь Т.Я., Дятлова Н.М., Архипова О.Г., Рудомино М.В. Фосфорорганические комплексоны. // *Успехи химии*. 1968. Т. 37. С. 1161–1191 (Kabachnik M.I., Medved' T.Ya., Dyatlova N.M., Arkhipova O.G., Rudomino M.V. Organophosphorus Complexones. // *Russ. Chem. Rev*. 1968. Vol. 37 (7). P. 503–518. <https://doi.org/10.1070/RC1968v037n07ABEH001662>)
10. Horwitz E.P., Kalina D.G., Kaplan L., Mason G.W., Diamond H. Selected Alkyl(Phenyl)-N, N-Dialkylcarbamoylmethylphosphine Oxides as Extractants for Am(III) from Nitric Acid Media. // *Separation Science and Technology*. 1982. Vol. 17. № 10. P. 1261-1279. <https://doi.org/10.1080/01496398208060649>
11. Jensen M., Chiarizia R., Ulicki J.S., Spindler B.D., Murphy D., Hossain M.M., Roca-Sabio A., Blas A., Rodríguez-Blas T. Solvent Extraction Separation of Trivalent Americium from Curium and the Lanthanides. // *Solvent Extr. and Ion Ex*. 2015. Vol. 33. № 4. P. 329-345. <https://doi.org/10.1080/07366299.2015.1046292>
12. Литвина М.Н., Чмутова М.К., Мясоедов Б.Ф., Кабачник М.И. Экстракция редкоземельных элементов и америция и факторы их разделения в системах азотная кислота – оксиды диарил(диалкил)диалкилкарбамоилметил]фосфинов. // *Радиохимия*. 1996. Т. 38. Вып. 6. С. 525-530.
13. Чмутова М.К., Литвина М.Н., Прибылова Г.А., Иванова Л.А., Мясоедов Б.Ф., Смирнов И.В., Шадрин А.Ю. Извлечение трансплутониевых элементов из высокоактивных отходов с использованием дифенил(дибутилкарбамоилметил)фосфиноксида. // *Радиохимия*. 1999. Т. 41. Вып. 4. С. 331-335.
14. Chmutova M.K., Kochetkova N.E., Koiro O.E., Myasoedov B.F., Medved' T.Ya., Nesterova N.P., Kabachnik M.I. Extraction of transplutonium elements with diphenyl- (alkyl)dialkyl-carbamoylmethyl phosphine oxides // *Journal Radioanalytical Chemistry*. 1983. Vol. 80. P. 63-69. <https://doi.org/10.1007/BF02517648>.
15. Розен А.М., Никифоров А.С., Николотова З.И., Карташева Н.А. Влияние строения бидентатных фосфорорганических соединений на их экстракционную способность // *Доклады академии наук СССР*. 1985. Т. 285. № 1 С. 165-169.
16. Сафиуллина А.М., Лизунов А.В., Горюнов Е.И., Бодрин Г.В., Горюнова И.Б., Стрелкова Т.В., Григорьев М.С., Брель В.К., Тананаев И.Г. Производные (2-карбамоилэтил)дифенилфосфиноксидов: синтез и экстракционные свойства по отношению к актинидам и лантанидам. // *Журнал неорганической химии*. 2024. Т. 69. № 1. С. 99-109. <https://doi.org/10.31857/S0044457X24010124> (Safiulina A.M., Lizunov A.V., Goryunov E.I., Bodrin G.V., Goryunova I.B., Strelkova T.V., Grigoriev M.S., Brel V.K., Tananaev I.G. Derivatives of (2-Carbamoylethyl) diphenylphosphine Oxides: Synthesis and Extraction Properties toward Actinides and Lanthanides. // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2024. Vol. 69. № 1. P. 94–102. <https://doi.org/10.1134/S0036023623602751>)

17. Сафиулина А.М., Ананьев А.В., Лизунов А.В., Туиза М., Логунов М.В., Двоеглазов К.Н. Экспериментальное моделирование извлечения технеция(VII) из рафинатов после экстракционной переработки ОЯТ. // Журнал неорганическая химия. 2020. Т. 65. № 12. С. 1697-1704. <https://doi.org/10.31857/S0044457X20120144> (Safiulina A.M., Anan'ev A.V., Lizunov A.V., Tuiza M., Logunov M.V., Dvoeglazov K.N. *Experimental Modeling of Technetium(VII) Recovery from Raffinates after Extractive Reprocessing of Spent Nuclear Fuel.* // *Russian Journal of Inorganic Chemistry.* 2020. Vol. 65. №. 12. P. 1928–1934. <https://doi.org/10.1134/S0036023620120141>)

Поступила в редакцию / Received 01.12.2025

Поступила после рецензирования / Revised 02.12.2025

Принята к публикации / Accepted 05.12.2025