

раздел ХИМИЯ

УДК 547-32:546.65:542.61

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2026.3.6

ЭКСТРАКЦИОННОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ ЛАНТАНОИДОВ И ИТТРИЯ РЕАГЕНТОМ НА ОСНОВЕ НЕОДЕКАНОВОЙ КИСЛОТЫ И ДИЭТИЛЕНТРИАМИНА© Э. И. Нуртдинов¹, С. О. Бондарева^{2*}¹Уфимский университет науки и технологий
Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.²Уфимский институт химии УФИЦ РАН
Россия, Республика Башкортостан, 450054 г. Уфа, пр. Октября, 71.

*Email: bondarevaso@anrb.ru

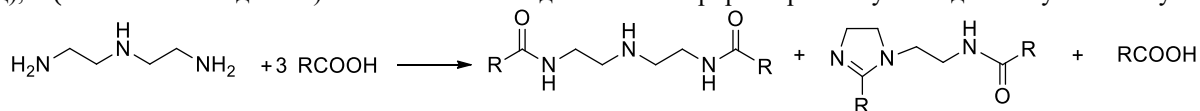
Изучено экстракционное извлечение и разделение лантана(III), празеодима(III), эрбия(III) и иттрия(III) из хлоридных растворов смесевым реагентом, содержащим N,N'-(иминодиэтан-2,1-диил)-ди(неононанамид), 1-(2-неонониламидоэтил)-2-неононил-2-имидазолин и неодекановую кислоту в мольным соотношении 1:1:2 соответственно (разбавитель – 15 об.% раствор n-деканол в толуоле). Исследовано влияние кислотности водной фазы на эффективность извлечения лантаноидов и иттрия в органическую фазу. Определены коэффициенты разделения пар редкоземельных металлов. Показана возможность применения реагента для концентрирования редкоземельных металлов на стадиях экстракции и рекстракции.

Ключевые слова: N,N'-(иминодиэтан-2,1-диил)-ди(неононанамид), 1-(2-неонониламидоэтил)-2-неононил-2-имидазолин, неодекановая кислота, экстракционное разделение, иттрий, лантаноиды.

Введение

Редкоземельные металлы (РЗМ), группа из 17 элементов, включающая 15 лантаноидов, скандий и иттрий, относятся к числу стратегических материалов. Даже малые количества этих веществ при промышленном производстве позволяют получать уникальные по свойствам и качеству технические продукты и изделия из них. РЗМ широко используются для производства оборонной продукции, реактивных двигателей, спутниковых систем, люминофорных материалов, постоянных магнитов, сверхпроводников, автомобильных катализаторов и высокотехнологичной электроники [1–2]. Ценность РЗМ зависит от их эффективного разделения на высокочистые соединения, а трудности, возникающие при разделении РЗМ, обусловлены их схожими физическими и химическими свойствами. В большинстве российских месторождений содержание РЗМ невелико, а извлечение не всегда рентабельно. Обычно более богатыми сырьевыми источниками РЗМ являются вторичные ресурсы: отходы производства и потребления катализаторов, люминофоров, флуоресцентных ламп и постоянных магнитов [3–5]. В отходах технологических процессов, таких как отвальный фосфогипс, шлаках фосфорного производства, красных шлаках, содержатся очень низкие концентрации РЗМ, однако их объем значителен, поэтому техногенные отходы являются потенциально важным источником сырья для получения РЗМ [5–7]. При экстракции лантаноидов из низкоконтрированных растворов, образующихся при переработке бедного или техногенного сырья, рациональнее использовать относительно дешевые карбоновые кислоты (например, Versatic 10 или Versatic 911, нафтеновые кислоты, олеиновую кислоту) [3, 8–10]. В целом карбоновые кислоты не являются селективными реагентами; для повышения коэффициентов разделения РЗМ карбоновые кислоты можно применять в смеси с другими экстрагентами, в т.ч. с фосфорорганическими кислотами или нейтральными фосфорорганическими соединениями, четвертичными аммониевыми солями и азотсодержащими основаниями [11–14].

Недавно [15] простым одностадийным методом термической конденсации неодекановой кислоты с диэтилентриамином нами был синтезирован новый реагент, содержащий N,N'-(иминодиэтан-2,1-диил)-ди(неононанамид), 1-(2-неонониламидоэтил)-2-неононил-2-имидазолин и непрореагировавшую неодекановую кислоту:



Смесевой реагент показал себя эффективным экстрагентом при извлечении и разделении эрбия(III) и иттрия(III) из нитратных растворов.

В настоящей работе изучена возможность экстракционного извлечения и разделения лантана(III), празеодима(III), эрбия(III) и иттрия(III) из хлоридных растворов с помощью смесового реагента.

Экспериментальная часть

Синтез и идентификация смесового реагента описаны в [15]. В экстракционных экспериментах применяли 5%-ный раствор реагента, содержащий ~0,1 М неodeкановой кислоты, 0,045 М N,N'-(иминодиэтан-2,1-диил)-ди(неононанамид)а и 0,05 М 2-неононил-амидоэтил-2-неононил-2-имидазолина. В качестве экстракционного разбавителя использовали толуол «х. ч.» в смеси с *n*-деканолом квалификации «ч» (15% по объему).

Исходные растворы хлоридов РЗМ готовили, растворяя соответствующие хлориды лантаноидов в дистиллированной воде. Исходный раствор хлорида иттрия(III) готовили, растворяя карбонат иттрия $Y_2(CO_3)_3 \cdot 3H_2O$ в растворе 1 М соляной кислоты. Необходимое значение pH задавалось введением в систему растворов NaOH или HCl. Постоянную ионную силу полученных растворов (3,0 моль/л) поддерживали с помощью NaCl. Все используемые реактивы соответствовали квалификации «х. ч.».

Опыты по экстракции и реэкстракции проводили в термостатируемых делительных воронках при интенсивном перемешивании, время контакта фаз, достаточное для установления экстракционного равновесия, составляло 5 мин [15], температура 25 ± 1 °С. Погрешность определения величины pH равновесных водных фаз не превышала 0,05. Концентрацию РЗМ в исходных растворах, равновесных водных и органических фазах после реэкстракции 0,1 моль/л раствором HCl определяли трилонометрическим титрованием с индикатором ксиленоловым оранжевым. Коэффициенты распределения (*D*) рассчитывали как отношение концентраций РЗМ в равновесных органической и водной фазах. Степень извлечения (*E*, %) рассчитывали по формуле:

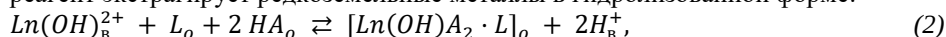
$$E = \frac{[Ln]_o \times [V]_o}{[Ln]_{исх} \times [V]_{исх}} \times 100, \quad (1)$$

где символы «о» и «исх» относятся к компонентам органической фазы и исходного раствора соответственно. Для определения емкости органической фазы по эрбию(III) или лантану(III) проводили трехкратное контактирование органической фазы со свежими порциями раствора, содержащего 0,02 моль/л $LnCl_3$ и 3,0 моль/л NaCl, O:B = 1:1. После реэкстракции определяли концентрацию металла в насыщенной органической фазе.

Разделение пар РЗМ изучали на модельных растворах состава (моль/л): $[Ln_1] = 0,030 \pm 0,002$, $[Ln_2] = 0,030 \pm 0,002$, $[NaCl] = 3,0$, $[HCl] = 0,01$. Концентрацию эрбия в реэкстрактах, рафинатах и модельных растворах определяли спектрофотометрическим методом, используя полосы поглощения $\lambda_{max} = 523$ нм и $\lambda_{max} = 652$ нм, связанные со сверхчувствительными электронными переходами $4I_{15/2} \rightarrow 2H_{11/2}$ и $4I_{15/2} \rightarrow 4F_{9/2}$ соответственно [16–17]. Для празеодима использовали полосы поглощения с максимумами при 444 и 589 нм, обусловленных электронными переходами $3H_4 \rightarrow 3P_2$ и $3H_4 \rightarrow 1D_2$ [17]. Электронные спектры записывали на спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu). Содержание иттрия и лантана в реэкстрактах, рафинатах и модельных растворах определяли по разности суммарной концентрации металлов, определяемой прямым комплексонометрическим титрованием, и концентрации эрбия или празеодима. Коэффициенты разделения (β) РЗМ рассчитывали как отношение коэффициентов распределения соответствующих металлов: $\beta = D_1/D_2$, где $D_1 > D_2$.

Результаты и их обсуждение

Смесовой реагент эффективно извлекает La(III), Pr(III), Y(III) и Er(III) из хлоридных растворов в интервале pH 5,5–7,0 (рис. 1). С увеличением pH водной фазы извлечение РЗМ увеличивается, не сопровождаясь образованием третьей фазы, поскольку реагент экстрагирует редкоземельные металлы в гидролизованной форме:



где L представляет реагент, HA – неodeкановую кислоту, индексы (в) и (о) относятся соответственно к водной и органической фазам.

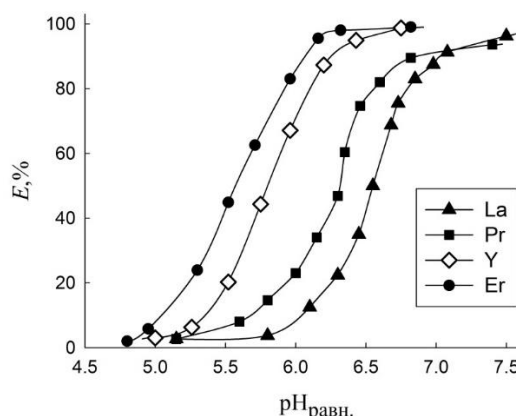


Рис. 1. Влияние кислотности равновесной водной фазы на степень извлечения лантана(III), празеодима(III), иттрия(III) и эрбия(III) 5%-ным раствором реагента.

Исходный раствор: 0,020 моль/л Ln(III) + 3,0 моль/л NaCl, разбавитель – 15 об.% раствор *n*-деканола в толуоле.

В интервале pH 6,4–6,9 достигается 96–99% извлечение иттрия и эрбия, лантан и празеодим извлекаются на 90–95% в интервале pH 7,0–7,5. На основании уравнения (2) теоретическая емкость 5%-ного раствора экстрагента по извлекаемым металлам должна составлять около 0,05 моль/л. За три цикла при pH равновесной водной фазы $5,9 \pm 0,1$ в 5%-ный раствор экстрагента извлекли 0,042 моль/л эрбия(III) и 0,0165 моль/л лантана(III). Емкость органической фазы по лантану(III) можно повысить, увеличив кислотность водной фазы: так, при pH равновесной водной фазы $7,1 \pm 0,1$ емкость 5%-ного раствора экстрагента по лантану(III) составила 0,034 моль/л. Однако при этом значении pH в водной фазе наблюдалось частичное выделение лантана(III) в третью фазу.

Возможность экстракционного разделения пар РЗМ (табл. 1) изучали в условиях конкуренции между ионами металлов (суммарное содержание РЗМ в растворе составляло $0,06 \pm 0,002$ моль/л, что превышало теоретическую емкость экстрагента). Разделение пар Er–La, Er–Pr и Er–Y проводили в интервале pH 5,7–5,9, пары Pr–La и Y–Pr разделяли в интервале pH 6,0–6,3. В этих условиях степень извлечения металлов в органическую фазу не превышала 40%, но в экстракционной системе отсутствовала третья фаза.

Известно [8–9], что тяжелые лантаноиды экстрагируются α , α' -разветвленными карбоновыми кислотами лучше легких. В ряду извлечения лантаноидов иттрий находится рядом с гольмием в системах с неodeкановой кислотой [9] и между гадолинием и диспрозием в системе с Versatic 911 [8]. Добавление имидазолиновой фракции к раствору неodeкановой кислоты не повлияло на положение иттрия. Однако коэффициенты разделения пар Y–Pr и особенно Er–Y, полученные в экстракционных системах со смесевым реагентом, выше, чем при использовании только Versatic 911. Втор-октилфеноксиуксусная кислота (C12) и втор-нонилфеноксиуксусная (CA100) кислота – экстрагенты, разработанные Шанхайским институтом органической химии Китайской академии наук для отделения иттрия от лантаноидов: в системах с этими карбоновыми кислотами иттрий является наиболее сложным для извлечения. Коэффициент разделения пары Y–Pr в системе со смесевым реагентом меньше, чем в системе с CA12 [12]; при этом коэффициент разделения, полученный нами для пары Er–Y, оказался выше, чем в системах с CA12 или CA100.

Таблица 1

Коэффициенты разделения редкоземельных металлов (β)

Экстрагент (экстракционный разбавитель)	pH водной фазы	β				
		Pr–La	Er–La	Y–Pr	Er–Pr	Er–Y
5% раствор реагента L (15% раствор <i>n</i> -деканол в толуоле)	6,0±0,3	6,8±0,6	29±3	8,5±0,9	21,7±1,5	3,2±0,2
50% раствор реагента Versatic 911 (Shellsol A) [8]	6	–	–	7,14	–	2,25
0,1 М ди-(2-этилгексил)фосфат диоктиламина + 0,3 М каприлат диоктиламина (толуол) [13]	5,0–5,4	3,0	22,8	–	–	–
Тот же экстрагент [18]	5,0–5,4	7,75	37,4	–	–	–
0,8 М CA12 (20% раствор ТБФ в керосине) [12]	4,0±0,5	0,33	1,75	10,87	5,21	0,48
0,03 М CA100 + 0,02 М Суапex 301 (<i>n</i> -гептан) [11]	2,5–3,0	2,1	3,2	4,2	1,5	2,8
1 М раствор динонилфенилфосфорной кислоты (<i>n</i> -додекан) [19]	3 М HCl	2,47	29,17	10,88	9,44	1,77
0,05 М раствор ди-2-этилгексилфосфорной кислоты (<i>n</i> -гептан) [20]	3,0	–	–	4,39	–	0,78

Среди экстрагентов, представленных в табл. 1, наиболее близким аналогом синтезированного нами смесового реагента можно считать бинарный экстрагент на основе ди-(2-этилгексил) фосфорной кислоты и каприната диоктиламина; коэффициенты разделения пар РЗМ приведены для хлоридных [13] и нитратных растворов [18]. Поскольку основными промышленными экстрагентами РЗМ являются фосфорорганические кислоты, для сравнения также представлены коэффициенты разделения пар РЗМ, полученные для динонилфенилфосфорной кислоты и ди-2-этилгексилфосфорной кислоты [19–20]. На основании полученных нами результатов при экстракции хлоридов РЗМ смесевой реагент характеризуется относительно высокими коэффициентами разделения РЗМ.

На следующем этапе работы была изучена возможность применения смесового реагента для концентрирования РЗМ на стадиях экстракция-реэкстракция. На основании литературных данных [6; 21] в процессе азотно-кислотного выщелачивания фосфогипса образуются растворы, содержащие 0,002–0,003 моль/л РЗМ преимущественно цериевой группы. Например, в работе [21] приведен раствор следующего состава: Ln – 85,9, Се – 159,2, Pr – 10,7, Y – 11,9, Er – 49,3 мг·л^{–1}, полученный после трех циклов обработки измельченного образца фосфогипса 3 М раствором HNO₃ при температуре 25 °С. На основании расчетов суммарная концентрация РЗМ в данном растворе составляет 0,00226 моль/л. Концентрирование РЗМ за одну ступень экстракции изучали на примере лантана(III) при соотношении объемов водной и органической фаз 5:1 и 10:1 (табл. 2). Так как эффек-

тивность извлечения РЗМ смесями карбоновых кислот с аминами возрастает при увеличении концентрации выделяющих добавок в водной фазе [22–23], в исходный раствор дополнительно добавляли нитрат натрия (3 моль/л). При замене нитрата натрия хлоридом натрия были получены практически идентичные результаты.

Таблица 2

Концентрирование ионов лантана на стадии экстракции
в зависимости от кислотности равновесной водной фазы
(исходный раствор: $2,26 \cdot 10^{-3}$ моль/л La(III) + 3,0 моль/л NaNO₃, pH 2)

Соотношение водной и органической фаз (В:О)	Кислотность равновесной водной фазы	Концентрация La(III) в органической фазе (моль/л)	Извлечение лантана(III) в органическую фазу (E, %)
5:1	6,91±0,10	0,0095*	84,1*
	7,01±0,10	0,010	88,9
	7,20±0,10	0,0103*	91,2*
	7,55±0,10	0,0107	94,7
	7,90±0,10	0,0110*	97,3*
10:1	7,03±0,10	0,0159	70,4
	7,18±0,10	0,0186*	82,3*
	7,40±0,10	0,0210	92,9

*исходный раствор: $2,26 \cdot 10^{-3}$ моль/л La(III) + 3,0 моль/л NaCl

В случае В:О = 5:1 при pH равновесной водной фазы ~ 7,5 в органическую фазу извлекается около 95% лантана, содержащегося в исходном растворе. Повышение pH равновесной водной фазы до 7.9–8.0 увеличивало степень извлечения лантана, но сопровождалось незначительным образованием третьей фазы (< 1% лантана). При соотношении водной и органической фаз 10:1 незначительное образование третьей фазы (< 0.5% лантана) наблюдалось уже при pH равновесной водной фазы ~ 7.5. Проведенные эксперименты показали, что при соотношении В:О = 5–10:1 за одну ступень экстракции из исходного раствора в органическую фазу переходит 90–95% лантана (pH равновесной водной фазы 7.2–7.5). Можно ожидать, что в аналогичных условиях извлечение смесевым реагентом суммы РЗМ будет более эффективным, поскольку лантан(III) экстрагируется хуже остальных РЗМ (рис. 1).

Из органической фазы РЗМ за одну стадию количественно реэкстрагируются разбавленными растворами минеральных кислот; реэкстракция, как и экстракция, характеризуется высокой скоростью. Легкость реэкстракции РЗМ из смесового реагента дает возможность осуществлять концентрирование РЗМ и на стадии реэкстракции. Для количественной реэкстракции РЗМ за одну стадию pH равновесной водной фазы должна быть ≤ 3. Из экстрактов, содержащих 0,01–0,02 моль/л La(III) (табл. 2), при соотношении водной и органической фаз 1:5 лантан полностью реэкстрагируется 0,5 М раствором HCl (для улучшения расслоения фаз к растворам HCl добавляли 1–2 М NaCl).

В результате за 1 цикл «экстракция-реэкстракция» объем реэкстракта по сравнению с исходным раствором выщелачивания уменьшился в 25–50 раз, при этом достигалось 20–35-кратное концентрирование лантана в реэкстракте.

Заключение

Установлено, что смесовой реагент эффективно извлекает редкоземельные металлы из хлоридных растворов: в интервале pH 6,4–6,9 достигается 96–99% извлечение иттрия и эрбия, лантан и празеодим извлекаются на 90–95% в интервале pH 7,0–7,5. Из органической фазы металлы за одну стадию количественно реэкстрагируются 0,1–0,5 М растворами минеральных кислот. Показана возможность разделения пар эрбий–лантан ($\beta = 29$), эрбий–празеодим ($\beta = 21,7$), эрбий–иттрий ($\beta = 3,2$), иттрий–празеодим ($\beta = 8,5$) и празеодим–лантан ($\beta = 6,8$) в хлоридных растворах. Смесовой реагент перспективен для предварительного концентрирования редкоземельных металлов на стадиях экстракции и реэкстракции при переработке низкоконцентрированных хлоридных или нитратных растворов.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Химия» УФИХ УФИЦ РАН и Регионального центра коллективного пользования «Агидель» УФИЦ РАН по теме государственного задания №125020601626-9.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крюков В. А., Толстов А. В., Самсонов Н. Ю. Стратегическое значение редкоземельных металлов в мире и в России // ЭКО. 2012. № 11. С. 5–16. [Kryukov V. A., Tolstov A. V., Samsonov N. Yu. Strategic importance of rare earth metals in the world and in Russia // ECO. 2012. No. 11. P. 5–16].
2. Михайлов Ю. М. Редкоземельные металлы как основа получения перспективных материалов, необходимых для развития вооружения и военной техники // Федеральный справочник: оборонно-промышленный комплекс. М., 2014. С. 127–134. [Mikhailov Yu. M. Rare earth metals as a basis for obtaining promising materials necessary for the development of weapons and military equipment. Federal Handbook: Defense Industrial Complex. Moscow, 2014. P. 127–134].

3. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 24-2017. Производство редких и редкоземельных металлов. М.: Бюро НДТ, 2017. 202 с. [Information and technical reference book on the best available technologies. ITS 24-2017. Production of rare and rare earth metals. Moscow: NDT Bureau, 2017. 202 p.]. URL: <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://meganorm.ru/Data2/1/4293740/4293740352.pdf&ved=2ahUKEwiK1anjufiFAxVGGRAIHbskDesQFnoECBE-QAQ&usq=AOvVaw1NXeqzOMYdrTEkMSCvB4Rz>.
4. Binnemans K., Jones P. T., Blanpain B., et al. Recycling of rare earths: a critical review // *J. Clean. Prod.* 2013. V. 51. P. 1–22.
5. Walawalkar M., Nichol C. K., Azimi G. Process investigation of the acid leaching of rare earth elements from phosphogypsum using HCl, HNO₃, and H₂SO₄ // *Hydrometallurgy*. 2016. Vol. 166. P. 195–204.
6. Lokshin E. P., Vershkova Y. A., Vershkov A. V., Tareeva O. A. Efficiency of sulfuric acid leaching of lanthanides in relation to quality of phospho-semihydrate obtained from khibiny apatite concentrate // *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2002. Vol. 75. P. 1572–1576.
7. Бочевская Е. Г., Абишева З. С., Каршигина З. Б. и др. Поведение редкоземельных элементов при азотнокислом выщелачивании шлака фосфорного производства // Комплексное использование минерального сырья. 2016. №1. С. 9–16. [Bochevskaya E. G., Abisheva Z. S., Karshigina Z. B., et al. Behavior of rare earth elements at the nitrate acid leaching of slag from phosphorus production // *Complex Use of Mineral Resources*. 2016. No. 1. P. 9–16].
8. Brown C. G., Sherrington L.G.J. Solvent extraction used in industrial separation of rare earths // *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*. 1979. Vol. 29. No. 4. P. 193–209.
9. Singh D. K., Singh H., Mathur J. N. Extraction of rare earths and yttrium with high molecular weight carboxylic acids // *Hydrometallurgy*. 2006. Vol. 81. No. 3–4. P. 174–181.
10. Литвинова Т. Е., Черемисина О. В. Разделение и извлечение лантаноидов из низкоконцентрированного сырья с применением экстракционных методов // Записки Горного института. 2014. Т. 210. С. 78–85. [Litvinova T. E., Cheremisina O. V. Separation and extraction of lanthanides from low concentrations of raw materials using extraction methods // *Journal of Mining Institute*. 2014. Vol. 210. P. 78–85].
11. Tong S., Zhao X., Song N., et al. Solvent extraction study of rare earth elements from chloride medium by mixtures of *sec*-nonylphenoxy acetic acid with Cyanex301 or Cyanex302 // *Hydrometallurgy*. 2009. Vol. 100. P. 15–19.
12. Li W., Wang X., Meng S., et al. Extraction and separation of yttrium from the rare earths with *sec*-octylphenoxy acetic acid in chloride media // *Separation and Purification Technology*. 2007. Vol. 54. No. 2. P. 164–169.
13. Kalyakin S. N., Kuz'min V. I., Mulagaleeva M. A. Binary extraction of lanthanide(III) chlorides using carboxylates and dialkylphosphates of secondary and tertiary amines // *Hydrometallurgy*. 2015. Vol. 151. P. 116–121.
14. Patsos N., Lewis K., Picchioni F., Kobrak M. N. Extraction of acids and bases from aqueous phase to a pseudoprotic ionic liquid // *Molecules*. 2019. Vol. 24. No. 5. Art. 894.
15. Бондарева С. О. Экстрагент на основе диэтиленetriами́на и неodeкановой кислоты для извлечения редкоземельных металлов // Вестник Башкирского университета. 2024. Т. 29. №3. С. 148–153. [Bondareva S. O. Extractant based on diethylenetriamine and neodecanoic acid for the extraction of rare earth metals // *Bulletin of Bashkir University*. 2024. Vol. 29. No. 3. P. 148–153].
16. Guskos N., Majszczyk J., Typek J., et al. Relative intensities of f-f transitions of erbium(III) ion studied by photoacoustic spectroscopy // *Reviews on Advanced Materials Science*. 2010. Vol. 23. No. 1. P. 97–101.
17. Volkovich V. A., Ivanov A. B., Yakimov S. M., et al. Electronic absorption spectra of rare earth (III) species in NaCl–2CsCl eutectic based melts // *AIP Conference Proceedings*. 2016. Art. 1767.
18. Калякин С. Н., Кузьмин В. И., Мулагалева М. А. Извлечение нитратов лантаноидов (III) смесями бинарных экстрагентов – карбоксилатов и диалкилфосфатов аминов // Журнал Сибирского федерального ун-та. Химия. 2015. Т. 4. №8. С. 580–589. [Kalyakin S. N., Kuz'min V. I., Mulagaleeva M. A. Solvent extraction the nitrate of lanthanide (III) binary mixtures extragents – carboxylate and dialkyl phosphate amines // *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2015. Vol. 8. No. 4. P. 580–589].
19. Anitha M., Kotekar M. K., Singh D. K., et al. Solvent extraction studies on rare earths from chloride medium with organophosphorous extractant dinonyl phenyl phosphoric acid // *Hydrometallurgy*. 2014. Vol. 146. P. 128–132.
20. Song N., Zhao X., Jia Q., et al. Extraction of rare earths using mixtures of *sec*-octylphenoxy acetic acid and organophosphorus acids // *Korean Journal of Chemical Engineering*. 2010. Vol. 27. No. 4. P. 1258–1261.
21. Ismail Z. H., Abu Elgoud E. M., Abdel Hai F., et al. Leaching of some lanthanides from phosphogypsum fertilizers by mineral acids // *Arab Journal of Nuclear Science and Applications*. 2015. Vol. 48. No. 2. P. 37–50.
22. Matsumoto M., Yamaguchi T., Tahara Y. Extraction of rare earth metal ions with an undiluted hydrophobic pseudoprotic ionic liquid // *Metals*. 2020. Vol. 10. Art. 502.
23. Bondareva S. O., Spirikhin L. V., Lobov A. N., Murinov Yu. I. Solvent extraction of neodymium(III) from chloride solutions using a mixture of diacylated diethylenetriamines and carboxylic acids // *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 2017. Vol. 35. No. 5. P. 332–344.

Поступила в редакцию 22.04.2026 г.

DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2026.3.6

**EXTRACTIVE SEPARATION OF LANTHANIDES AND YTTRIUM
USING EXTRACTANT BASED ON DIETHYLENETRIAMINE
AND NEODECANOIC ACID**© **E. I. Nurtdinov¹, S. O. Bondareva^{2*}**¹*Ufa University of Science and Technology
32 Zaki Validi st., 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.*²*Ufa Institute of Chemistry, Ufa Federal Research Centre of RAS
71 Oktyabrya pr., 450054 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.***Email: bondarevaso@anrb.ru*

The extraction and separation of lanthanum(III), praseodymium(III), erbium(III), and yttrium(III) from chloride solutions was studied using a mixture of N,N'-(iminodietane-2,1-diyl)-di(neononanamide), 1-(2-neononylamidoethyl)-2-neononyl-2-imidazoline, and neodecanoic acid in a molar ratio of 1:1:2, respectively, in toluene with 15 vol.% n-decanol. The effect of aqueous phase acidity on the efficiency of lanthanide and yttrium extraction into the organic phase was investigated, and the loading capacities of the mixtures for Er(III) and La(III) were determined. The La/Pr, Y/Pr, Er/La, Er/Pr, and Er/Y separation factors were calculated. The reagent is promising for pre-concentration of rare-earth metals at the extraction and stripping stages.

Keywords: N, N'-(iminodiethane-2,1-diyl)-di(neononanamide), 1-(2-neononylamidoethyl)-2-neononyl-2-imidazoline, neodecanoic acid, extractive separation, lanthanides, yttrium.

*Received 22.04.2026.***Об авторах / About the authors****НУРТДИНОВ Эмиль Ильдарович**

Уфимский университет науки и технологий,
бакалавр,
Email: emil.sarissa@mail.ru

NURTDINOV Emil Ildarovich

Ufa University of Science and Technology,
Bachelor,
Email: emil.sarissa@mail.ru

БОНДАРЕВА Светлана Олеговна

Уфимский институт химии –
обособленное структурное подразделение
Уфимского федерального исследовательского центра РАН,
канд. хим. наук, старший научный сотрудник
лаборатории физико-химических методов анализа.
Email: bondarevaso@anrb.ru

BONDAREVA Svetlana Olegovna

Ufa Institute of Chemistry,
Ufa Federal Research Center of RAS,
Cand. Chem. Sci., Senior Researcher
of the Laboratory of Physicochemical Methods of Analysis,
Email: bondarevaso@anrb.ru
ORCID: 0000-0001-8545-4092.
Scopus Author ID 6603034840.