УДК 542.61:661.865.4

ХИМИЯ ЭКСТРАКЦИИ La(NO₃)₃ И Ce(NO₃)₃ ИЗ НИТРАТНЫХ РАСТВОРОВ СМЕСЯМИ НИТРАТА МЕТИЛТРИ-*н*-ОКТИЛАММОНИЯ И ТРИ-*н*-БУТИЛФОСФАТА В ТОЛУОЛЕ

© 2021 г. С. И. Степанов^{а,} *, Нгуен Тхи Иен Хоа^а, А. М. Чекмарев^а, А. Ю. Цивадзе^b

^аРоссийский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия ^bИнститут физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия *e-mail: chao step@mail.ru

Поступила в редакцию 20.11.2020 г. После доработки 01.12.2020 г. Принята к публикации 03.12.2020 г.

Методом изомолярных серий установлены границы областей синергетной экстракции нитрата лантана и нитрата церия(III) из низкокислотных нитратных растворов с высаливателем NH_4NO_3 1.0 M изомолярными смесями нитрата три-*н*-октилметиламмония с три-*н*-бутилфосфатом в толуоле. Впервые химия экстракции в установленных областях проявления синергетного эффекта определена как непрерывная последовательность экстрагируемых смешанных комплексов состава ($R_4N)_n[Ln(NO_3)_{3+n} \cdot mTE\Phi]$, где n = 1-3, m = 3-1 для лантана и n = 1-3, m = 4-1 для церия(III) в зависимости от мольного соотношения экстрагентов. Антибатная последовательность в изменении значений *n* и *m* в смешанных комплексах с ростом концентрации четвертичной соли в смеси объяснена замещением фосфорильных лигандов три-*н*-бутилфосфата нитратными лигандами нитрата три-*н*октилметиламмония вплоть до полного их вытеснения из координационной сферы лантаноида.

Ключевые слова: нитрат лантана, нитрат церия(III), синергетная экстракция, нитрат метилтри-*н*-октиламмония, три-*н*-бутилфосфат, смеси экстрагентов, нитратные растворы **DOI:** 10.31857/S0040357121020111

ВВЕДЕНИЕ

Экстракция редкоземельных элементов (РЗЭ) смесями экстрагентов различных классов нашла широкое применение в технологии их разделения в 1980-х годах. В большинстве случаев экстракционные смеси, состоящие, как правило, из двух экстрагентов, проявляли синергетный эффект, заключающийся в сверхаддитивном распределении целевого компонента (применительно к тематике данной статьи – редкоземельного элемента (Ln)) из водной фазы в смесь двух экстрагентов [1]. Промышленное применение для разделения РЗЭ средней группы нашли синергетные смеси солей четвертичных аммониевых оснований (ЧАО, ЧАС) и нейтральных фосфорорганических соединений (НФОС), в частности нитрат метилтриалкиламмония (ТАМАН) и три-н-бутилфосфат (**ТБФ**) [2]. В научно-технической литературе конца XX-начала XXI вв. разгорелась широкая полемика о химии экстракции РЗЭ смесями ЧАС и НФОС, в том числе о составе экстрагируемых синергетных соединений. Достаточно подробный обзор работ по этой тематике до 2004 г. представлен в монографии С.И. Степанова и А.М. Чекмарева [3, с. 149-156]. Основные споры велись вокруг двух

ключевых экстрагируемых комплексов — однозарядного смешанного комплекса состава $R_4N[Ln(NO_3)_4 \cdot n(H\Phi OC)]$ и двухзарядного комплекса $(R_4N)_2[Ln(NO_3)_5 \cdot n(H\Phi OC)]$, где R_4N — однозарядный катион четвертичного аммония, n = 1-3, H ΦOC : ТБ Φ , фосфиноксид разнорадикальный (ΦOP), ди-*изо*-октилметилфосфонат (**ДИОМ** Φ), три-*н*-октилфосфиноксид (**ТОФО**).

В работах А.К. Пяртмана [4, 5] была постулирована экстракция однозарядного комплекса РЗЭ цериевой группы, т.е. элементов от La до Nd, и двухзарядного — для РЗЭ средней и тяжелой групп от Sm до Lu.

В работах С.И. Степанова и А.М. Чекмарева [3, с. 172–184] рассматривали более широкий спектр образующихся соединений, выходящий за рамки только одно- или двухзарядного комплексов.

Развитие редкометалльной промышленности, наступившее после 2011 г., в том числе редкоземельного производства, поставило новые задачи по разделению РЗЭ всех трех групп – легкой, средней и тяжелой. Основными средами, принятыми для разделения РЗЭ в нашей стране, являются азотнокислые среды. Однако высокая стоимость азотной кислоты, потребление которой в экстракционной технологии велико, потребовали перехода к низкокислотным нитратным растворам как средам для разделения РЗЭ и поискам эффективных экстракционных систем для разделительных процессов. Такими эффективными системами являются смеси ЧАС и НФОС, и, в частности, смеси нитрата метилтри-*н*-октиламмония (**ТОМАН**) и ТБФ. Если для разделения РЗЭ средней группы накоплен достаточно большой опыт использования смесей ТАМАН-ТБФ из нитратных растворов, то разделение легкой группы РЗЭ (ЛРЗЭ) этими смесями практически не изучено. И в первую очередь для решения практических задач экстракционной технологии необходимо точное знание составов экстрагируемых соединений ЛРЗЭ из низкокислотных нитратных растворов смесями ЧАС-ТБФ в широкой области соотношений компонентов.

Целью настоящей работы является определение методом изомолярных серий областей синергетной экстракции и состава экстрагируемых соединений нитрата лантана и нитрата церия(III) из низкокислотных нитратных растворов с высаливателем смесями ТОМАН–ТБФ во всей области изменения их молярных отношений в смесях с использованием статистической обработки экспериментальных данных для выявления всех статистически значимых смешанных экстрагируемых соединений.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали La₂O₃, Ce(NO₃)₃ · 6H₂O, NH₄NO₃, ТБФ квалификации "ч"; NH₄OH, HNO₃, толуол квалификации "х. ч.". ТОМАН был получен по оригинальной методике с содержанием основного вещества CH₃(C₈H₁₇)₃NNO₃ 99.9% в пересчете на сухой безводный продукт.

Исходные 1.0 М водные растворы La(NO₃)₃ и Ce(NO₃)₃ готовили растворением точных навесок La₂O₃ и Ce(NO₃)₃ · 6H₂O в расчетном количестве концентрированной HNO₃ и дистиллированной воде соответственно, после чего в полученные растворы вносили расчетную навеску твердого NH₄NO₃ и после полного ее растворения доводили рН приготовленного раствора до 2, что соответствовало концентрации HNO₃ ~0.01 M, 1.0 М водными растворами аммиака или HNO₃.

1.0 М изомолярные растворы ТОМАН–ТБФ в толуоле готовили в мерных колбах на 100 мл. В колбу вносили расчетное количество 3.65 М ТБФ и расчетное количество 1.96 М ТОМАН, после чего смесь доводили толуолом до метки. Концентрацию ТОМАН в исходном экстрагенте устанавливали по содержанию R_4N^+ групп потенциометрическим титрованием йодидной формы четвертичной соли 0.1 М водным раствором AgNO₃ в смеси 50 об. %

пропанола и 50 об. % воды в присутствии йодидселективного электрода фирмы "Раделкис" (Венгрия).

Экстракцию лантана и церия проводили в стеклянных пробирках с притертыми крышками объемом 10-25 мл при комнатной температуре $20 \pm 2^{\circ}$ С, интенсивном перемешивании, соотношении объемов органической и водной фаз О : B = 1 : 1 (по 5–10 мл), времени контакта фаз 15 мин, времени расслаивания фаз 10–20 мин, после чего проводили отбор аликвоты водной фазы, которую анализировали на содержание лантаноида комплексонометрическим титрованием в присутствии индикатора ксиленолового оранжевого [6].

Для верификации результатов, полученных при анализе водной фазы на содержание La и Ce в отдельных пробах, проводили их определение в равновесных органических фазах после "мокрого" сжигания аликвоты экстракта в смеси кислот $HNO_3 + HClO_4$ в колбах Кьельдаля при нагревании на газовой горелке. Пробу раствора после "мокрого" сжигания количественно переносили в коническую колбу из термостойкого стекла на 250 мл и анализировали трилонометрическим методом.

Коэффициенты распределения $D_{\rm Ln}$ рассчитывали по традиционной формуле: $D_{\rm Ln} = C_{\rm opr}/C_{\rm водн} = (C_{\rm исх} - C_{\rm водн})/C_{\rm водн}$, где $C_{\rm исх}$, $C_{\rm водн}$ и $C_{\rm opr}$ – исходная концентрация La или Ce(III) в водной и равновесные концентрации в водной и органической фазах, соответственно. Синергетный эффект $S_{\rm Ln}$ рассчитывали по уравнению $S_{\rm Ln} = D_{\rm cm}/(D_1 + D_2)$, где $D_{\rm cm}$ – экспериментально определенный коэффициент распределения La или Ce(III) для раствора смеси экстрагентов; D_1 и D_2 – коэффициенты распределения La или Ce(III) для индивидуального раствора каждого экстрагента при их концентрациях, равных в смешанном растворе. При $S_{\rm Ln} > 1$ наблюдается синергетный эффект, а при $S_{\rm Ln} < 1$ – антисинергетный или антагонистический эффект [3, с. 135–137].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены зависимости коэффициентов распределения лантана D_{La} от исходных концентраций ТБФ, ТОМАН и состава их 1.0 М изомолярных смесей при экстракции из низкокислотного нитратного раствора с высаливателем. Для зависимости D_{La} от концентрации ТБФ средняя статистическая ошибка определения концентрации лантана в исходном (титрование 5 аликвот) и равновесных водных растворах по 9 точкам (3 серии экспериментов с трехкратным титрованием каждой точки) при доверительной вероятности 95% составила 0.028 и 3.93% соответственно. Средняя статистическая ошибка в определении величины D_{La} для трех идентичных серий экспериментов этой зависимости составила 7.89%. Для зависимости D_{La} от концентрации ТО-МАН средняя ошибка определения равновесной концентрации при тех же условиях составила 3.23%, а для $D_{La} - 6.49\%$. Для усредненных экспериментальных точек обеих зависимостей была проведена процедура сглаживания по 5 точкам [7].

Результирующие зависимости после соответствующей обработки (рис. 1) представляют собой плавные кривые с промежуточными перегибами, целочисленные мольные отношения La : ТБФ(ТОМАН) для которых соответствуют образованию в органической фазе сольватов La(NO₃)₃ · *m*ТБФ и комплексам состава (R₄N)_n[La(NO₃)_{3 + n}], где n = 1-2 [3].

Зависимость D_{La} от состава изомолярных смесей ТОМАН-ТБФ представляет собой кривую с 4 выраженными максимумами для составов ТОМАН-ТБФ: 0.35-0.65; 0.55-0.45; 0.75-0.25 и 0.9-0.1. Средняя статистическая ошибка экспериментального определения D_{La} для этой зависимости составила 4.51%, что верифицирует значимость максимумов на экспериментальной кривой.

На рис. 1 представлена также синергетная кривая или зависимость синергетного эффекта S_{La} от состава изомолярных смесей, рассчитанная по описанным выше зависимостям D_{La} . Точки, лежащие выше значений $S_{La} = 1$, определяют область синергетной экстракции, которая простирается от состава 0.15 М ТОМАН–0.85 М ТБФ до состава 0.9 М ТОМАН–0.1 М ТБФ. Прилежащие к этой области составы ТОМАН–ТБФ характеризуются антагонистическим эффектом. На синергетной кривой выделяются два ярко выраженных максимума с величиной $S_{La} = 1.33$ и 1.30 для составов 0.35 М ТБФ соответственно. Для си-



Рис. 1. Зависимость D_{La} от концентрации ТБФ (*1*), ТОМАН (*2*), состава смесей ТОМАН–ТБФ (*3*) и синергетная кривая (*4*) при экстракции лантана из раствора, содержащего 0.88 M La(NO₃)₃, 4.0 M NH₄NO₃, 0.01 M HNO₃.

нергетных смесей с шагом в 0.05 М были проведены расчеты мольных отношений La: TOMAH: ТБФ по экспериментально определенным содержаниям лантана в органической фазе, представленные в табл. 1.

С учетом высокой концентрации $La(NO_3)_3 = 0.88$ М в исходном нитратном растворе и наличия в водной фазе высаливателя содержание лантана в органических экстрактах близко к насыщению. Поэтому мольные отношения, представленные в табл. 1, можно рассматривать как отношения компонентов в экстрагируемом комплексе, на основании которых может быть предложен состав экстрагируемых соединений.

ТБФ, М 0.85 0.80 0.75 0.70 0.65 0.60 0.55 0.50 TOMAH, M 0.15 0.20 0.25 0.30 0.35 0.40 0.45 0.50 ТБФ: ТОМАН 4:11.9:1 5.7:1 3:1 2.3:13:2 1.2:11:10.196 La(NO₃)₃, орг., М 0.219 0.231 0.245 0.252 0.249 0.248 0.255 $TБ\Phi$: La(NO₃)₃ 4.33 3.66 3.25 2.86 2.58 2.41 2.22 1.96 0.92 $TOMAH : La(NO_3)_3$ 0.76 1.08 1.23 1.39 1.61 1.82 1.96 ТБФ, М 0.45 0.40 0.35 0.30 0.25 0.20 0.15 0.10 0.55 0.60 0.65 0.70 0.80 0.90 TOMAH, M 0.75 0.85 ТБФ: ТОМАН 1:1.2 2:3 1:1.9 1:2.3 1:3 1:41:5.7 1:9 La(NO₃)₃, орг., М 0.268 0.260 0.254 0.248 0.255 0.249 0.265 0.271 $TE\Phi$: La(NO₃)₃ 1.68 1.54 1.38 1.21 0.98 0.80 0.57 0.37 $TOMAH : La(NO_3)_3$ 2.05 2.31 2.56 2.82 2.94 3.21 3.21 3.32

Таблица 1. Мольные отношения La : ТБФ : ТОМАН в области синергетной экстракции из растворов, содержащих 0.88 M La(NO₃)₃, 4.0 M NH₄NO₃ и 0.01 M HNO₃



Рис. 2. Зависимость $D_{Ce(III)}$ от концентрации ТБФ (1), ТОМАН (2), состава смесей ТОМАН–ТБФ (3) и синергетная кривая (4) при экстракции церия(III) из раствора, содержащего 1.0 М Ce(NO₃)₃, 4.0 М NH₄NO₃, 0.01 М HNO₃.

В соответствии с литературными данными, рассмотренными в [3, с. 149-156], экстракция РЗЭ смесями нитратов ЧАО с ТБФ сопровождается образованием смешанных комплексов состава $(R_4N)_n[Ln(NO_3)_{3+n} \cdot mTБ\Phi]$, где n = 1-2, m = 1 - 3. Согласно данным табл. 1, в области изменения концентрации ТОМАН от 0.15 до 0.3 М химию экстракции определяет образование комплексов состава $R_4N[La(NO_3)_4 \cdot 3TE\Phi]$ и R₄N[La(NO₃)₄ · 2ТБФ]. Дальнейший рост концентрации ТОМАН в смеси вплоть до 0.6 М сопровождается образованием двухзарядных комплексов состава $(R_4N)_2[La(NO_3)_5 \cdot 3TБ\Phi]$ и $(R_4N)_2[La(NO_3)_5 \cdot 2TБ\Phi]$, которые экстрагируются наряду с однозарядными смешанными комплексами ТОМАН с ТБФ. В области 0.6-0.9 М ТОМАН протекает образование трехзарядных смешанных комплексов состава $(R_4N)_3[La(NO_3)_6$ (1-2)ТБФ], содержащих 1 или 2 молекулы ТБФ в своем составе. При концентрации 0.9 М ТОМАН и выше экстракция сопровождается образованием анионных нитратных комплексов лантана с ТОМАН состава $(R_4N)_n[La(NO_3)_{3+n}]$, где n = 3-4. $T E \Phi$ в этом случае полностью вытесняется из координационной сферы лантана нитратным лигандом и не оказывает влияния на его экстракцию четвертичной солью.

Два максимума на синергетной кривой соответствуют экстракции наиболее устойчивых смешанных комплексов состава $R_4N[La(NO_3)_4 \cdot 3T F \Phi]$ и $(R_4N)_2[La(NO_3)_5 \cdot 2T F \Phi]$. Основным мотивом в изменении состава экстрагируемых смешанных соединений лантана является замещение во внутренней координационной сфере фосфорильного лиганда нитратным при увеличении содержания ТОМАН в смеси. При значительном преобладании ТОМАН наблюдается образование трехзарядного анионного комплекса, содержащего 1 молекулу ТБФ (один фосфорильный лиганд) и последующее образование анионного комплекса с ТОМАН, содержащего 6 и даже 7 нитратных лигандов в своем составе.

Область с низким содержанием ТОМАН, от 0.05 до 0.15 М, характеризуется антагонистическим эффектом при экстракции лантана из нитратных растворов с низкой кислотностью и высоким содержанием высаливателя. Этот эффект обусловлен, по-видимому, сольватацией ТОМАН избытком ТБФ в органической фазе, приводящей к понижению термодинамической активности ТОМАН [3, с. 42], неспособного в этих условиях эффективно экстрагировать однозарядный анионный комплекс состава NH₄[La(NO₃)₄], который образуется в водном нитратном растворе при избытке NH₄NO₃.

На рис. 2 представлены зависимости $D_{Ce(III)}$ от концентрации ТОМАН, ТБФ и состава их 1.0 М изомолярных смесей, а также синергетная кривая.

Как и при экстракции лантана смесями ТОМАН–ТБФ, на синергетной кривой $S_{Ce(III)}$ – состав 1.0 М изомолярных смесей ТОМАН–ТБФ выделяется область синергетной экстракции, простирающаяся от состава 0.2 М ТОМАН–0.8 М ТБФ до состава 0.7 М ТОМАН–0.3 М ТБФ с максимумом $S_{Ce(III)} = 1.75$ для состава 0.5 М ТОМАН–0.5 М ТБФ. Области 1.0–0.85 М ТБФ и от 0.25–0.95 М ТБФ характеризуются антагонистическим эффектом – $S_{Ce(III)} \leq 1$.

Таким образом, область синергетной экстракции Ce(III) 1.0 М смесями ТОМАН–ТБФ в толуоле сужается по сравнению с таковой для La. Однако, максимальное значение синергетного эффекта для Ce(III) в 1.3 раза выше, чем для La, а положение максимума смещено в область 0.5 М ТОМАН–0.5 М ТБФ. В табл. 2 представлены мольные отношения Ce(III) : ТБФ : ТОМАН для области синергетной экстракции с шагом 0.05 М.

Данные табл. 2 позволяют сделать заключение о составе экстрагируемых соединений Ce(III) смесями ТОМАН–ТБФ различного состава. При мольном отношении ТОМАН : ТБФ = 1 : 4 экстракция Ce(III) сопровождается образованием смешанного комплекса $R_4N[Ce(NO_3)_4 \cdot 4TБФ]$, содержащего 4 фосфорильных лиганда во внутренней координационной сфере. С ростом концентрации ТОМАН в смесях от 0.2 до 0.5 М наряду с однозарядным анионным смешанным комплексом наблюдается экстракция двухзарядного, состава (R_4N)₂[Ce(NO_3)₅ · (2–3)ТБФ], в котором с уменьшением концентрации ТБФ закономерно уменьшается число фосфорильных лигандов от 3 до 2. В точке максимума синергетного эффекта –

	- 3					
ТБФ, М	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60	0.55
TOMAH, M	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45
ТБФ : ТОМАН	4:1	3:1	2.3:1	1.9 : 1	3:2	1.2:1
Се(NO ₃) ₃ , орг., М	0.202	0.216	0.240	0.254	0.282	0.280
$TE\Phi: Ce(NO_3)_3$	3.96	3.47	2.92	2.56	2.13	1.96
TOMAH : $Ce(NO_3)_3$	0.99	1.16	1.25	1.38	1.42	1.61
ТБФ, М	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
ТОМАН, М	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
ТБФ : ТОМАН	1:1	1:1.2	2:3	1:1.9	1:2.3	1:3
La(NO ₃) ₃ , орг., М	0.301	0.259	0.277	0.258	0.240	0.248
$TE\Phi: Ce(NO_3)_3$	1.66	1.74	1.44	1.36	1.21	1.01
$TOMAH : Ce(NO_3)_3$	1.66	2.13	2.16	2.52	2.92	3.03

Таблица 2. Мольные отношения Ce(III) : ТБФ : ТОМАН в области синергетной экстракции из растворов, содержащих 1.0 M Ce(NO₃)₃, 4.0 M NH₄NO₃ и 0.01 M HNO₃

0.5 М ТОМАН-0.5 М ТБФ в соответствии с наблюдаемыми мольными отношениями Ce(III) : ТБФ : ТОМАН наиболее вероятна совместная экстракция двух смешанных комплексов состава $R_4N[Ce(NO_3)_4 \cdot 4TБ\Phi]$ и $(R_4N)_2[Ce(NO_3)_5 \cdot 2TБ\Phi]$ в равных долях. Дальнейшее повышение содержания ТОМАН в смесях сопровождается образованием трехзарядного нитратного анионного комплекса Ce(III) с ТОМАН, включающего 1 молекулу ТБФ $(R_4N)_3$ [Ce $(NO_3)_6 \cdot TБФ$], вплоть до состава 0.75 М ТОМАН-0.25 М ТБФ. Для составов. содержаших более 0.75 М ТОМАН. экстракция протекает с образованием трехзарядного комплекса состава $(R_4N)_3$ [Ce $(NO_3)_6$], не содержащего молекул ТБФ в своем составе. Мольное отношение Ce(III) : ТОМАН в этой области увеличивается от 3.0 до 3.8 для 1.0 М раствора ТОМАН в толуоле, однако концентрация Ce(III) в органической фазе изменяется от 0.233 до 0.264 М. При экстракции индивидуальными 0.75-1.0 М растворами ТОМАН концентрация Ce(III) в органической фазе также изменяется от 0.235 до 0.264 М, что подтверждает образование только анионных нитратных комплексов Ce(III) с ТОМАН. Возможно, что экстракция комплекса $(R_4N)_3[Ce(NO_3)_6]$ сопровождается дополнительной сольватацией 1-2 свободными молекулами R₄NNO₃.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом изомолярных серий определены границы синергетной экстракции нитрата лантана и нитрата церия(III) из растворов, содержащих 0.88 M La(NO₃)₃ или 1.0 M Ce(NO₃)₃, 0.01 M HNO₃, 4.0 M NH₄NO₃, соответственно, 1.0 М изомолярными смесями ТОМАН–ТБФ в толуоле, простирающиеся от состава 0.15 М ТОМАН–0.85 М ТБФ до состава 0.9 М ТОМАН–0.1 М ТБФ для лантана и от 0.2 М ТОМАН–0.8 М ТБФ до 0.7 М

ТОМАН-0.3 М ТБФ для церия(III). В отличие от известных литературных данных об экстракции лантана и церия(III) преимущественно в форме одного или двух смешанных комплексов с нитратом ЧАО + ТБФ, впервые химия экстракции в установленной области проявления синергетного эффекта определена как непрерывная последовательность экстрагируемых смешанных комплексов состава $(R_4N)_n[Ln(NO_3)_{3+n} \cdot mTБ\Phi]$, где n == 1-3, m = 3-1 для лантана и n = 1-3, m = 4-1для церия(III) в зависимости от соотношения ТОМАН-ТБФ. С ростом концентрации ТОМАН в смеси фосфорильные лиганды ТБФ замещаются нитратными лигандами ТОМАН вплоть до полного вытеснения ТБФ из координационной сферы лантана или церия(III). Этот процесс сопровождается повышением зарядности образующихся анионных нитратных комплексов от однодо трехзарядного и понижением сольватного числа ТБ Φ от 3–4 до 1. При значительном избытке ТБФ в смесях с ТОМАН наблюдается антагонистический эффект экстракции лантана и церия(III). обусловленный сольватацией ТОМАН молекулами ТБФ и понижением его термодинамической активности в экстракционном процессе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение о предоставлении гранта № 075-15-2020-782).

ОБОЗНАЧЕНИЯ

- С концентрация, М
- *D* коэффициент распределения
- *S* синергетный коэффициент

ИНДЕКСЫ

1, 2	номера экстрагентов
Ce(III)	церий трехвалентный
La	лантан
Ln	лантаноид
водн	равновесная концентрация в водной фазе
исх	исходная концентрация
орг	равновесная концентрация в органической фазе
СМ	смесь экстрагентов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

 Косынкин В.Д., Сарычев Г.А., Селивановский А.К., Трубаков Ю.М., Федулова Г.Т. Технология получения индивидуальных редкоземельных элементов (РЗЭ) из суммарного концентрата, выделенного из монацита, основанная на отечественных экстрагентах // V Международная конференция-школа по химической технологии XT'16: сб. тез. докл. сателл. конф. XX Мендел. съезда по общ. и прикл. химии. 16–20 мая 2016 г.: в 3 т. Волгоград: ВолгГТУ, 2016. Т. 1. С. 124.

- Вальков А.В., Сергиевский В.В. Смеси фосфорорганических экстрагентов с нитратом метилтриалкиламмония в технологии самария, гадолиния, тербия и эрбия // Перспективы добычи, производства и применения РЗМ: тез. докл. 1-й Всеросс. науч.практ. конф. 26–27 сентября 2011 г. М.: ВНИИХТ, 2011. С. 1.
- 3. Степанов С.И., Чекмарев А.М. Экстракция редких металлов солями четвертичных аммониевых оснований. М.: ИздАТ, 2004.
- 4. Пяртман А.К., Копырин А.А., Ковалев С.В., Кескинов В.А. Влияние разбавителей на процессы экстракции нитратов лантанидов(III) и иттрия(III) нитратами четвертичных аммониевых оснований и три-н-бутилфосфатом // Проблемы комплексного использования руд. Тез. докл. 2-го Межд. симп. СПб., 1996. С. 244.
- Копырин А.А., Пяртман А.К. Закономерности распределения лантанидов(III) в многокомпонентных системах при использовании экстрагентов различных классов и их смесей // 11-я Российская конференция по экстракции. Тез. докл. М., 1998. С. 133.
- 6. Бусев А.И., Типцова В.Г., Иванов В.М. Руководство по аналитической химии редких элементов. М.: Химия, 1978.
- Румшиский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. Справочное руководство. М.: Наука, 1971.