

РАЗДЕЛЕНИЕ РЗЭ(III) И Am(III) ЭКСТРАКЦИЕЙ СОЕДИНЕНИЯМИ ЦИРКОНИЯ И ДИБУТИЛФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ ИЗ РАСТВОРОВ АЗОТНОЙ И СОЛЯНОЙ КИСЛОТ

© 2021 г. Д. Н. Шишкин*, Н. К. Петрова

Радиевый институт им. В. Г. Хлопина, 194021, Санкт-Петербург, 2-й Мушинский пр., д. 28
*e-mail: dn.shishkin@mail.ru

Получена 27.03.2020, после доработки 03.06.2020, принята к публикации 16.06.2020

Исследовано поведение редкоземельных элементов (РЗЭ) и америция при их экстракции соединениями циркония и дибутилфосфорной кислоты (ДБФК) в различных растворителях из растворов азотной и соляной кислот. Показано, что РЗЭ и Am(III) при большом мольном соотношении ДБФК к Zr извлекаются в органическую фазу в виде нестехиометрических соединений, состоящих из катионов РЗЭ и циркония и десятков или сотен молекул ДБФК. Способность к образованию таких соединений возрастает с увеличением порядкового номера лантанида. При изменении концентрации циркония в органической фазе в ряде случаев наблюдается заметное изменение степеней разделения элементов. Использование декалина в качестве разбавителя приводит к максимальному увеличению коэффициентов распределения РЗЭ(III) и Am(III). В системах с соляной кислотой с растворителями хлороформ или *o*-нитротолуол (ОНТ) при определенном соотношении ДБФК к Zr америций экстрагируется хуже РЗЭ, что может позволить осуществить их разделение.

Ключевые слова: РЗЭ, ТПЭ, экстракция, ДБФК, цирконий, разделение.

DOI: 10.31857/S0033831121040109

Разделение РЗЭ и ТПЭ является важной задачей радиохимической технологии, так как выделение америция и кюрия из ВАО значительно снижает радиотоксичность отходов и риски, связанные с хранением отвержденных РАО. Нахождение лучших условий разделения соседних лантаноидов облегчает выделение ценных элементов, применяемых в ядерной и других технологиях. Например, ^{144}Ce и ^{147}Pm используются в качестве источников тепла, эрбий и гадолиний находят применение в качестве поглотителей нейтронов в регулирующих стержнях ядерных реакторов и выгорающего поглотителя в ядерном топливе и т.д. [1].

В конце 1960-х гг. Уивер нашел, что при добавлении циркония к фосфорорганическим кислотам усиливается экстракция ряда элементов [2]. Наибольшее усиление экстракции наблюдается у

щелочноземельных металлов, РЗЭ и ТПЭ. В дальнейшем исследование металлосодержащих фосфорорганических кислот было продолжено. Было показано, что ди-2-этилгексилфосфорная кислота (Д2ЭГФК), содержащая гафний, более селективна к РЗЭ, чем Д2ЭГФК в отсутствие Hf [3]. Коэффициент распределения РЗЭ для соединения Zr с Д2ЭГФК возрастает в 6 раз, а для соединения с Hf – в 100 раз. Максимальная экстракция европия наблюдается при соотношении фосфорорганическая кислота (ФОК) : Hf, равном 6. В качестве ФОК были исследованы ДБФК, диамилфосфорная кислота, динонилфосфорная кислота, Д2ЭГФК и др. Авторами было сделано предположение, что причиной улучшения экстракции металлов является усиление кислотных свойств Д2ЭГФК в органической фазе в результате образования координационных свя-

Таблица 1. Влияние концентрации Zr в экстрагенте на распределение элементов. Водная фаза: 1 моль/л HNO₃, РЗЭ по 20 мг/л; органическая фаза: 0.2 моль/л ДБФК в CCl₄

Zr, ммоль/л	ДБФК/Zr, моль/моль	Коэффициенты распределения								
		²⁴¹ Am	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	Er
0		0.02	0.03	0.04	0.04	0.09	0.09	0.09	1.7	3.2
0.11	1800	0.02	0.03	0.04	0.04	0.09	0.09	0.09	1.8	3.6
0.22	900	0.03	0.03	0.04	0.05	0.13	0.13	0.14	2.2	4.1
0.44	450	0.08	0.06	0.1	0.1	0.21	0.21	0.23	2.8	4.8
0.88	220	0.17	0.09	0.23	0.25	0.42	0.4	0.42	3.5	6.5
1.76	110	0.43	0.13	0.65	0.70	1	0.9	1	4.8	11
3.52	55	0.81	0.30	2.2	2.2	3.5	3.5	3.6	6.7	15
7	28	5.5	0.56	7	9.1	10	10	11	14	24
1.76	10	0.23	0.11	0.37	0.39	0.45	0.46	0.44	1	1

зей молекул Д2ЭГФК с кислой циркониевой солью Д2ЭГФК [3, 4].

Значительный объем исследований был сделан по определению экстракционных свойств соединений циркония и ДБФК. Эти исследования привели не только к определению механизма экстракции различных элементов (главным образом РЗЭ), но и к разработке процесса фракционирования ВАО с выделением фракций РЗЭ и ТПЭ [5–8].

В настоящей работе продолжено исследование экстракции РЗЭ(III) и Am(III) соединениями ДБФК и Zr в различных разбавителях и растворах азотной и соляной кислот с целью нахождения наилучших условий разделения РЗЭ и Am и соседних лантаноидов.

Нахождение условий разделения элементов в растворах соляной кислоты без использования комплексонов могло бы облегчить выделение изотопов при их наработке в условиях горячих камер и боксов, а в будущем, при создании недорогого коррозионно-устойчивого к соляной кислоте оборудования, и в заводских условиях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Органические реагенты подвергали дополнительной очистке от примесей. ДБФК очищали по методике [9]. Органические растворители –хлороформ, ОНТ и четыреххлористый углерод – предварительно промывали растворами NaOH и HNO₃, декалин и толуол квалификации хч. дополнительной

очистке не подвергали. В качестве радиоактивных меток использовали изотопы ²⁴¹Am и ¹⁵⁴Eu производства АО «Изотоп». Содержание РЗЭ и ДБФК (по концентрации фосфора) в водной фазе определяли методом ИСП–АЭС на приборе IRIS. ²⁴¹Am и ¹⁵⁴Eu в органической и водной фазах определяли методом γ-спектрометрии на спектрометре фирмы Canberra. РЗЭ перед анализом методом ИСП–АЭС предварительно реэкстрагировали из органической фазы раствором карбоната аммония с трилоном Б (О : В = 1 : 5). Опыты проводили в мерных пробирках при температуре 20 ± 1°С. По 2 мл органической и водной фаз помещали в пробирку объемом 15 мл и перемешивали на мешалке с переворотом пробирок в течение 60 мин. Концентрация суммы РЗЭ в исходном растворе не превышала 1 ммоль/л. Погрешность их определения на ИСП-спектрометре находилась в диапазоне 1–7%. Аликвоты отбирали на анализ после центрифугирования. Степень разделения элементов определили как отношение их коэффициентов распределения (D).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены коэффициенты распределения (D) микроколичеств ²⁴¹Am и некоторых элементов ряда РЗЭ, присутствующих в ВАО, в зависимости от содержания циркония в экстрагенте – растворе ДБФК в CCl₄.

Как следует из результатов, представленных в таблице, добавление циркония к ДБФК приводит к усилению экстракции всех исследованных лантани-

Таблица 2. Влияние концентрации Zr в экстрагенте на коэффициенты распределения Am и лантанидов. Водная фаза: 1 моль/л HNO₃, РЗЭ по 20 мг/л; органическая фаза: 0.2 моль/л ДБФК в ОНТ

Zr, ммоль/л	ДБФК/Zr, моль/моль	Коэффициенты распределения								
		²⁴¹ Am	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy
0		<0.01	<0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.55
0.1	2000	<0.01	<0.01	0.02	0.03	0.05	0.06	0.07	0.08	0.86
0.2	1000	<0.01	<0.01	0.03	0.04	0.07	0.08	0.11	0.10	1.17
0.4	500	0.02	0.01	0.04	0.06	0.1	0.14	0.18	0.19	2.0
0.8	250	0.04	0.1	0.06	0.07	0.12	0.18	0.21	0.22	2.4
1.6	125	0.08	0.13	0.16	0.17	0.37	0.51	0.63	0.62	6.8

дов и америция. Интересной особенностью данной экстракционной системы является то, что коэффициент распределения церия с увеличением содержания циркония в экстрагенте растет медленнее, чем у других лантанидов. При соотношении ДБФК/Zr = 28 степень разделения лантанидов и церия превышает 10, что может быть использовано для их разделения. Увеличение коэффициента распределения металла на величину более 15% (наибольшая погрешность определения *D*) для некоторых элементов наблюдается уже при мольном соотношении ДБФК/Zr = 900. Более тяжелые лантаниды (Sm–Er) начинают заметно увеличивать коэффициент распределения раньше, чем легкие (Ce–Nd) и Am.

Увеличение *D* может быть связано с присутствием в органической фазе комплексной кислоты – соединения ДБФК с Zr, хорошо экстрагирующей РЗЭ. Как было показано ранее [5–8], наибольшие коэффициенты распределения РЗЭ наблюдаются при мольном соотношении ДБФК/Zr, равном 8–10.

В нижней строке табл. 1 приведены значения *D*, полученные для системы с 1.76 ммоль/л Zr, 17.6 ммоль/л ДБФК (соотношение ДБФК/Zr равно 10). Если сравнить коэффициенты распределения металлов, полученные для этой системы, со значениями *D*, полученными для 0.2 моль/л ДБФК и для системы 0.2 моль/л ДБФК + 1.76 ммоль Zr (соотношение ДБФК/Zr равно 110), то окажется, что для большинства исследованных элементов (кроме Ce) коэффициент распределения металла для последней системы значительно превышает сумму коэффициентов распределения, полученных для экстрагента, содержащего 0.2 моль/л ДБФК, и экстрагента состава 1.76 ммоль/л Zr + 17.6 ммоль/л ДБФК. Это, по нашему мнению, говорит о том, что лантаниды

и америций в данной системе экстрагируются не только ДБФК и ее стехиометрическими соединениями с Zr с соотношением ДБФК/Zr 8–10, но и соединением ДБФК и Zr, включающем десятки молекул ДБФК. Это соединение названо нами гиперкомплексом. По-видимому, цирконий и ДБФК образуют гиперкомплексы так же, как и ХДК образует гиперкомплексы с ДБФК [10], с соединениями ДБФК с Zr [11] и с фосфорорганическими кислотами [12]. Отличием является то, что в данном случае центром гиперкомплекса, объединяющим молекулы ДБФК, является катион циркония, а не анион ХДК.

В табл. 2 приведены коэффициенты распределения ²⁴¹Am и лантанидов в зависимости от содержания циркония в экстрагенте – растворе ДБФК в ОНТ.

В этой экстракционной системе металлы извлекаются в несколько раз хуже, чем в системе с растворителем CCl₄, однако увеличение *D* начинается при больших соотношениях ДБФК/Zr, что, по-видимому, говорит о том, что в полярном растворителе ОНТ соединение ДБФК с Zr обладает большей способностью к образованию гиперкомплексов с лантанидами и ТПЭ, чем в неполярном растворителе CCl₄. В то же время экстракционная способность экстрагента к лантанидам с растворителем CCl₄ выше, чем у экстрагента с растворителем ОНТ.

В табл. 3 приведены коэффициенты распределения микроколичеств ²⁴¹Am и ¹⁵⁴Eu при их экстракции ДБФК и соединениями ДБФК с Zr в различных растворителях.

Коэффициент распределения микроколичеств ²⁴¹Am-241 и ¹⁵⁴Eu при их извлечении в экстрагент, содержащий 200 ммоль/л ДБФК и 0.4 ммоль/л Zr,

Таблица 3. Влияние концентрации Zr и ДБФК в экстрагенте на распределение микроколичеств ^{241}Am и ^{154}Eu . Водная фаза: 1 моль/л HNO_3

ДБФК, ммоль/л	Zr, ммоль/л	ДБФК/Zr, моль/моль	Растворитель	Коэффициенты распределения	
				^{241}Am	^{154}Eu
200	0.4	500	ОНТ	0.02	0.15
4	0.4	10		0.002	0.003
200	0			0.011	0.04
200	0.4	500	<i>n</i> -Парафин	1.93	5.0
4	0.4	10		0.18	0.27
200	0			0.54	2.8
200	0.4	500	Декалин	0.09	0.47
4	0.4	10		0.01	0.015
200	0			0.02	0.11
200	0.4	500	Хлороформ	0.054	0.41
4	0.4	10		0.004	0.1
200	0			0.004	0.02
200	0.4	500	Толуол	0.092	0.22
4	0.4	10		<0.001	<0.001
200	0			<0.005	0.025

для всех исследованных растворителей гораздо выше суммы коэффициентов распределения этих элементов для экстрагентов, содержащих 200 ммоль/л ДБФК и экстрагента с 4 ммоль/л ДБФК и 0.4 ммоль/л Zr (в толуоле для ^{241}Am более чем в 10 раз). Это, по нашему мнению, говорит о том, что катион Zr способен объединить десятки молекул ДБФК с образованием нестехиометрического соединения, обладающего большей экстракционной способностью, чем ДБФК и стехиометрическое соединение Zr и ДБФК.

Изотермы экстракции неодима в системах 200 ммоль/л ДБФК в *n*-парафине и 200 ммоль/л ДБФК + 4 ммоль/л Zr в *n*-парафине. Водная фаза: 1 моль/л HNO_3 .

Как видно из рис.1, разница в концентрации неодима в экстрактах на отдельных участках изотерм достигает 11 ммоль/л, что в несколько раз превышает емкость экстрагента, содержащего стехиометрическое соединение состава 4 ммоль/л Zr + 40 ммоль/л ДБФК. Этот факт также подтверждает экстракцию Nd нестехиометрическим соединением ДБФК и Zr. По-видимому, катион циркония объединяет вокруг себя десятки молекул ДБФК и одновременно увеличивает их способность присоединять катионы РЗЭ за счет усиления кислотных свойств

ДБФК – увеличения подвижности гидроксильного протона.

В табл. 4 приведены коэффициенты распределения микроколичеств ^{241}Am -241 и ряда РЗЭ в зависимости от содержания циркония в экстрагенте – растворе ДБФК в ОНТ – при относительно небольших соотношениях ДБФК и циркония.

Увеличение содержания циркония в экстракционной системе приводит к росту *D* всех лантанидов, лантана и америция вплоть до соотношения ДБФК/Zr, равного 8 или 6. Для Ce и Nd максимум *D* наблюдается при соотношении 6, для остальных исследованных элементов наибольший коэффициент рас-

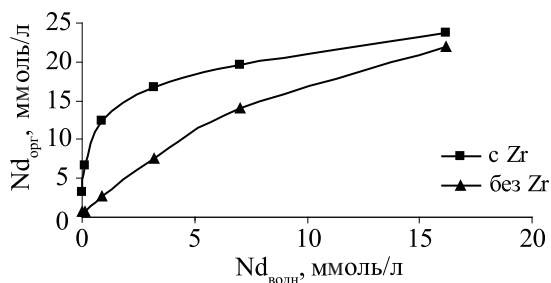
**Рис. 1** Изотермы экстракции неодима для растворов ДБФК в *n*-парафине, содержащих и не содержащих цирконий.

Таблица 4. Влияние концентрации Zr в экстрагенте на коэффициенты распределения элементов. Водная фаза: 1 моль/л HNO₃, РЗЭ по 20 мг/л; органическая фаза: 0.2 моль/л ДБФК в ОНТ

Zr, ммоль/л	ДБФК/Zr, моль/моль	Коэффициенты распределения								
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Dy	²⁴¹ Am
2	100	0.1	0.1	0.16	0.25	0.36	0.5	0.54	0.75	0.13
4	50	0.44	0.47	0.57	0.77	1.16	1.44	1.65	5.5	0.45
8	25	1.1	3.4	3.6	4.2	6	7.4	7.1	16.5	3.2
20	10	2.2	27	17	35	35	42	30	69	21
25	8	2.4	71	27	81	72	63	48	190	38
33	6	2.6	120	28	95	78	65	48	200	41

Таблица 5. Влияние содержания Zr в экстрагенте на коэффициенты распределения РЗЭ. Водная фаза: 2 моль/л HNO₃, РЗЭ по 20 мг/л; органическая фаза: 0.2 моль/л ДБФК в декалине

Zr, ммоль/л	ДБФК/Zr, моль/моль	Коэффициенты распределения								Р, мг/л
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	Tb	²⁴¹ Am	
2	100	0.31	0.34	0.42	0.38	0.64	0.58	0.62	0.32	260
4	50	0.59	1.4	1.6	1.65	2.5	2.1	2.1	1.42	240
8	25	1.6	8	7.3	8.5	8.8	9.3	9.6	7.2	240
20	10	3	29	19	16	12.4	35	35	13	170
25	8	3.3	69	30	44	39	63	85	38	130
33	6	3.4	107	39	215	115	85	105	118	110

Таблица 6. Влияние содержания Zr в экстрагенте на коэффициенты распределения РЗЭ. Водная фаза: 1 моль/л HNO₃, РЗЭ по 20 мг/л; органическая фаза: 0.2 моль/л ДБФК в хлороформе

Zr, ммоль/л	ДБФК/Zr, моль/моль	Коэффициенты распределения								Р, мг/л
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	Tb	²⁴¹ Am	
2	100	<0.02	0.09	0.16	0.17	0.3	0.45	0.45	0.09	110
4	50	0.08	0.33	0.48	0.47	0.83	1.1	1.1	0.27	110
8	25	0.92	3.3	3.5	4.3	6.6	7.8	7.9	2.3	110
20	10	2.8	30	20	37	40	39	47	23	82
25	8	3.2	45	25	60	61	48	56	44	70
33	6	3.0	54	28	80	80	52	58	55	64

пределения наблюдается при обоих значениях – 6 и 8. Вероятно, в этих условиях образуются наиболее устойчивые и/или наиболее гидрофобные экстрагируемые соединения.

Поведение лантана отличается от поведения лантанидов и Am. Коэффициент распределения La с увеличением содержания Zr растет значительно медленнее, чем у лантанидов, и при соотношении ДБФК/Zr = 6 D_{La} становится более чем на порядок меньше D всех лантанидов и америция. Другой осо-

бенностью системы является то, что при соотношении ДБФК/Zr = 10 и менее нарушается порядок монотонного увеличения D с увеличением порядкового номера лантанида. Коэффициент распределения церия становится заметно больше, чем D_{Pr} , а D_{Nd} превышает D ряда следующих за ним лантанидов и т.д.

В табл. 5 и 6 показаны коэффициенты распределения микроколичеств ²⁴¹Am и ряда РЗЭ в зависи-

Таблица 7. Влияние содержания Zr в экстрагенте на коэффициенты распределения РЗЭ. Водная фаза: 1 моль/л HCl, РЗЭ по 20 мг/л; органическая фаза: 0.2 моль/л ДБФК в хлороформе

Zr, ммоль/л	ДБФК/ Zr, моль/моль	Коэффициенты распределения								Р, мг/л
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	Y	²⁴¹ Am	
2	100	0.11	0.11	0.12	0.14	0.33	0.71	0.68	0.035	80
4	50	0.12	0.13	0.22	0.2	0.5	1.13	1.1	0.085	50
8	25	0.17	0.29	0.41	0.38	1	2.26	2.2	0.23	44
20	10	0.45	0.88	1.28	1.14	2.2	3.67	3.6	0.67	17
25	8	0.58	1.09	1.57	1.34	2.4	2.77	2.7	0.76	<10
33	6	0.51	0.89	1.26	1.05	1.53	1.34	1.34	0.61	<10

Таблица 8. Влияние содержания Zr в экстрагенте на коэффициенты распределения РЗЭ. Водная фаза: 1 моль/л HCl, РЗЭ по 20 мг/л; органическая фаза: 0.2 моль/л ДБФК в декалине

Zr, ммоль/л	ДБФК/Zr, моль/моль	Коэффициенты распределения								Р, мг/л
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	Y	²⁴¹ Am	
2	100	0.41	0.83	1.19	1.18	2.3	2.7	2.5	0.82	310
4	50	0.64	1.4	2.3	2	4.1	4.2	3.8	1.4	300
8	25	1.15	2.6	3.2	3.9	7.4	6.4	6	2.3	300
20	10	3	6.7	27	10.3	18.4	13.5	10.7	6.8	210
25	8	4.4	9	55	14	24	15	11.7	10.5	200
33	6	6.2	12	105	23	61	21	14	52	130

мости от содержания циркония в экстрагенте – растворах ДБФК в декалине и хлороформе.

Так же как и в ОНТ, в системах с растворителями декалин и хлороформ наблюдается заметное отличие в экстракционном поведении лантана и лантанидов. Так же при соотношении ДБФК/Zr = 10 и менее нарушается порядок монотонного увеличения *D* с увеличением порядкового номера лантанида. В отличие от системы с растворителем ОНТ в системах с растворителями декалин и хлороформ максимальные значения *D* лантана, лантанидов и америкия наблюдаются при соотношении ДБФК/Zr = 6. По экстракционной способности соединений Zr и ДБФК к РЗЭ и ТПЭ растворители располагаются в ряд: декалин >> ОНТ, хлороформ. Это относится как к экстракции нестехиометрическими соединениями, так и к экстракции стехиометрическими соединениями Zr и ДБФК. Чрезвычайно высокую экстракцию в декалин, по-видимому, можно объяснить специфической сольватацией – способностью ароматических соединений образовывать с органическими кислотами комплексы с переносом заряда [13]. Коэффициенты распределения РЗЭ и ТПЭ при их экстракции комплексами Zr и ДБФК на 2–3 по-

рядка превышают *D* при экстракции только ДБФК. Наиболее сильно возрастает экстракция Ce, Nd и Am.

При насыщении ДБФК цирконием заметно увеличивается наряду с силой комплексной кислоты Zr(ДБФК)_{*n*} и ее гидрофобность. Это видно по заметному уменьшению содержания фосфора в водной фазе экстракционных систем (табл. 5 и 6), связанного с присутствием в водной фазе только соединений ДБФК.

В табл. 7–9 показаны коэффициенты распределения микроколичеств ²⁴¹Am и ряда РЗЭ в зависимости от содержания циркония в экстрагенте – растворах ДБФК в декалине, хлороформе и ОНТ в системе, содержащей соляную кислоту.

В отличие от экстракционных систем с азотной кислотой во всех системах с HCl *D* элементов при насыщении экстрагента цирконием увеличивается гораздо слабее (на порядок и более). Кроме этого системы с HCl имеют ряд существенных отличий от систем с HNO₃.

Например, в системе с растворителем хлороформ в отличие от системы с HNO₃ La слабо от-

Таблица 9. Влияние содержания Zr в экстрагенте на коэффициенты распределения РЗЭ. Водная фаза: 1 моль/л HCl, РЗЭ по 20 мг/л; органическая фаза: 0.2 моль/л ДБФК в ОНТ

Zr, ммоль/л	ДБФК/Zr, моль/моль	Коэффициенты распределения								Р, мг/л
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Gd	Y	²⁴¹ Am	
2	100	0.13	0.12	0.14	0.13	0.24	0.53	0.48	0.041	70
4	50	0.13	0.15	0.21	0.20	0.68	1.52	1.44	0.11	70
8	25	0.17	0.28	0.33	0.34	0.78	1.84	1.78	0.22	70
20	10	0.58	1.07	1.45	1.36	2.1	2.86	2.7	0.73	30
25	8	0.61	1.37	1.93	1.68	2.52	2.37	2.2	1.21	15
33	6	0.64	1.38	1.84	1.65	2.2	1.54	1.6	1.03	<10

деляется от и лантанидов, коэффициенты распределения достигают максимальных значений при мольном соотношении ДБФК/Zr, равном 8 или 10 (Gd, Y). В системе с HNO₃ это соотношение 6 или 6–8. В системе хлороформ–HCl при соотношении ДБФК/Zr, равном 100, D_{Am} в 3 раза меньше D_{Ln} , что может позволить осуществить разделение РЗЭ и ТПЭ.

В системе с ОНТ, так же как и в системе с хлороформом, возможно разделение РЗЭ и Am при соотношении ДБФК/Zr, равном 100. Максимальные значения коэффициентов распределения наблюдаются при соотношении ДБФК/Zr, равном 6–8 для Am, La, Ce, Pr и Nd, 8 для Sm и 10 для Gd и Y.

Извлечение РЗЭ и Am соединениями ДБФК и Zr возможно как нестехиометрическими соединениями, содержащими в своем составе десятки и сотни молекул ДБФК, так и стехиометрическими с 6–10 молекулами ДБФК. Селективность извлечения металлов зависит от состава соединения ДБФК с цирконием, типа растворителя и вида минеральной кислоты в водной фазе. Определенное сочетание этих факторов может приводить к изменению экстракционного поведения РЗЭ и Am и позволить облегчить их разделение.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изотопы: свойства, получение, применение. / Под ред. В.Ю. Баранова. М.: Физматлит, 2005. 600 с.
2. Weaver B. // J. Inorg. Nucl. Chem. 1968. Vol. 30. P. 2233–2242.
3. Плеская Н.А. Исследование экстракционных свойств фосфорорганических кислот, содержащих цирконий и гафний: Дис. ... к.х.н. М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1979. 146 с.
4. Трофимова Е.П. Экстракционные свойства металл-содержащих фосфорорганических кислот и их применение для селективного экстракционно-хроматографического выделения редкоземельных элементов из сложных смесей: Автореф. дис. ... к.х.н. М.: МХТИ им. Д.И. Менделеева, 1983. 19 с.
5. Шмидт О.В. Экстракция трансплутониевых и редкоземельных элементов циркониевой солью дибутылфосфорной кислоты из азотнокислых растворов: Автореф. дис. ... к.х.н. СПб.: Радиовый ин-т им. В.Г. Хлопина, 2003. 21 с.
6. Блажева И.В., Федоров Ю.С., Зильберман Б.Я., Маширов Л.Г., Шмидт О.В. // Радиохимия. 2009. Т. 51, № 2. С. 132–137.
7. Шмидт О.В., Зильберман Б.Я., Федоров Ю.С., Паленик Ю.В., Голецкий Н.Д., Степанов А.И. // Радиохимия. 2003. Т. 45, № 6. С. 537–546.
8. Глеков Р.Г., Шмидт О.В., Паленик Ю.В., Голецкий Н.Д., Сухарева С.Ю., Зильберман Б.Я., Федоров Ю.С. // Химия и технология экстракции: Сб. науч. тр. РХТУ им. Д.И. Менделеева. М., 2001. Т. 1. С. 235–244.
9. Hardy C.J., Scargill D. // J. Inorg. Nucl. Chem. 1959. Vol. 10, N 3/4. P. 323.
10. Шишкин Д.Н., Петрова Н.К. // Радиохимия. 2013. Т. 55, № 4. С. 309–313.
11. Шишкин Д.Н., Петрова Н.К. // Радиохимия. 2016. Т. 58, № 1. С. 34–39.
12. Шишкин Д.Н., Петрова Н.К. // Dan. Sci. J. 2017. № 3. P. 4–10.
13. Коренман И.М. Экстракция в анализе органических веществ. М.: Химия, 1977. 200 с.