

ОБОГАЩЕНИЕ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

УДК 622.7; 54.05

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРХСШИТЫХ ПОЛИСТИРОЛЬНЫХ СОРБЕНТОВ В ПРОЦЕССАХ ВЫДЕЛЕНИЯ ЦЕННЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ АЗОТНОКИСЛЫХ РАСТВОРОВ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЭВДИАЛИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА

В. А. Чантурия, М. В. Рязанцева

*Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н. В. Мельникова РАН,
E-mail: ryzanceva@mail.ru, Крюковский тупик, 4, 111020, г. Москва, Россия*

Представлены результаты экспериментальных исследований, полученные при использовании синтетических сорбентов на основе сополимеров сверхсшитого полистирола с дивинилбензолом и винилпиридином для извлечения и разделения ценных компонентов (Zr, Σ РЗМ) из продуктивного раствора азотнокислого выщелачивания эвдиалита. Установлено, что на этапе выделения Zr и Σ РЗМ из продуктивного раствора наиболее перспективны хелатная смола марки Puromet MTS 9500 и бифункциональный сильноокислый катионит марки Purolite C160. Для Puromet MTS 9500 предложена схема ступенчатого градиентного элюирования, насыщенного ценным компонентом сорбента, позволяющая получить на выходе растворы Zr и Σ РЗЭ с извлечением 97.7 и 81.1 % соответственно. Эффективное разделение РЗМ на подгруппы достигается при использовании смолы марки ВП-ЗАП.

Сорбенты на основе сверхсшитого полистирола, продуктивный раствор азотнокислого выщелачивания, эвдиалитовый концентрат, редкоземельные элементы, селективное выделение

DOI: 10.15372/FTPRPI20240314
EDN: XDCAKG

Существующие процессы разделения редкоземельных металлов (РЗМ) основаны на двух подходах: жидкостная экстракция и сорбция [1 – 7]. К недостаткам экстракционных технологий относится их длительность и многоступенчатость, использование больших объемов токсичных и пожароопасных органических соединений, не всегда удовлетворительные показатели процесса.

Весьма перспективное направление для сильноокислых продуктивных растворов сложного ионного состава — направление, включающее в себя различного рода сорбционные и ионообменные технологии. Среди рукотворных сорбционных материалов особое место занимают сорбенты на основе сверхсшитого полистирола [8 – 10]. Химическая инертность позволяет применять его в таких агрессивных средах, как концентрированные растворы минеральных кислот (HNO_3 , HF, H_2SO_4). Важное достоинство сорбентов этого типа — стабильность объема слоя

сорбента в колонке при контакте с растворами электролитов разной концентрации, метод прост и легко может быть автоматизирован. Важно и то, что все использованные в работе сорбенты производятся в промышленном масштабе.

Анализ литературы, посвященной сорбционным процессам в области извлечения и разделения РЗМ, показал, что для этих целей используются органополимерные сорбенты (сильнокислые катиониты, сильноосновные аниониты, комплексообразующие сорбенты), неорганические сорбенты, твердофазные экстрагенты, гибридные органоминеральные сорбенты, биосорбенты, сорбенты с молекулярными отпечатками [11].

Цель настоящей работы — установление возможности применения различных типов ионообменников (органополимерных сорбентов) на основе сополимеров стирола с дивинилбензолом и винилпиридином для выделения Σ РЗМ из продуктивного раствора азотно-кислого выщелачивания эвдиалитового концентрата [12–14] и последующее разделение Σ РЗМ на подгруппы.

МАТЕРИАЛЫ, МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Использовались полистирольные сорбенты разных марок (табл. 1): сильноосновный анионит DOWEX 1x-8; сильноосновный анионит Purolite PCA 433; сильнокислый катионит Purolite C160; хелатная смола Puromet MTS9500; сильноосновный анионит АВ-17x-8 (ООО “Смолы”); сильноосновный анионит ВП-3АП (ООО “ЭКРАС”). При подготовке к эксперименту навеска сорбента выдерживалась сутки в 50 % растворе HNO_3 , затем сорбенты промывались дистиллированной водой до нейтральной реакции. Сорбционный эксперимент состоял в следующем: стеклянную колонку объемом 30 мл заполняли водой и гранулами сорбента, затем через эту колонку снизу вверх пропускали раствор (1 мл/мин) до тех пор, пока концентрация целевого компонента (Σ РЗМ) на выходе из колонки не становилась равной концентрации на входе в колонку (прямой эксперимент). После уравнивания колонки с исходным раствором электролит вытесняли потоком подвижной фазы сверху вниз (обратный эксперимент).

ТАБЛИЦА 1. Физико-химические свойства ионообменников

Смола, тип сорбента	DOWEX 1x-8	Purolite PCA433	Purolite C160	Puromet MTS9500	AB-17x-8	ВП-3АП
Полимерная матрица	Стирол-дивинилбензол					Винилпиридин-дивинилбензол
Функциональная группа	Триметил-аммоний	Четвертичное аммониевое основание I типа	Сульфоновая, аминифосфорная кислота	Аминофосфорная кислота	Бензил-триметил-аммоний	N-метилпиридиниевый, пиридиновый азот, диметилсульфат
Обменная емкость	1.2 г-экв./см ³	1.3 г-экв./см ³	2.4 г-экв./см ³	1.3 г-экв./см ³ Ca	1.0 г-экв./см ³	4.5–5.5 мг-экв./см ³ Cl
Структура	Гелевая	Гелевая	Макропористая	Макропористая	Гелевая	Макропористая
Прочее	Степень сшивки 8 %, pH 0–14					

Во всех случаях элюат отбирали фракциями по 2 мл, содержание металлов определяли методами масс-спектропии с индуктивно связанной плазмой, атомной адсорбции и масс-спектропии. В исследовании использовался продуктивный раствор кислотного выщелачивания эвдиалитового концентрата. Ниже представлено содержание химических элементов в растворах кислотного выщелачивания эвдиалита и концентрация РЗЭ в растворе:

Na	Ca	Zr	Fe	Hf	Al	Mn	Sr	Ti	K	Mg	Zn	Ba	Cu	Ni	Cr	Sc	Si	Nb	Σ REE
г/л										мг/л									
2.27	1.12	2.66	0.58	0.60	0.52	0.53	0.58	0.23	0.12	16.1	13.6	39.6	0.8	1.6	0.5	0.1	0.1	0.7	596.0
Sc	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu				
0.4	138.4	76.7	18.6	22.5	66.1	20.1	6.7	23.5	4.1	23.2	4.8	12.9	2.0	11.6	1.6				

В экспериментах по разделению Σ РЗМ на подгруппы использовался модельный раствор, ионный состав которого идентичен приведенному выше. Работа выполнялась в два этапа. Первый этап направлен на выделение Σ РЗМ из продуктивного раствора, имеющего сложный ионный состав, второй — на разделение Σ РЗМ на подгруппы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных данных и расчет материального баланса эксперимента показал, что при пропускании исходного продуктивного раствора через DOWEX 1x-8 за одну операцию в суммарную селективную фракцию извлекается 61.3 % Σ РЗЭ, в том числе 84.1 % церия, 87.9 % лантана, 44.1 % неодима и 28.5 % празеодима при отборе фракций элюата с 22 по 30 пробы (с 0.88 по 1.20 объема колонки). Цирконий выходит из сорбционной колонки вместе с тяжелыми РЗМ и щелочноземельными металлами в первых 0.75 объема колонки (рис. 1).

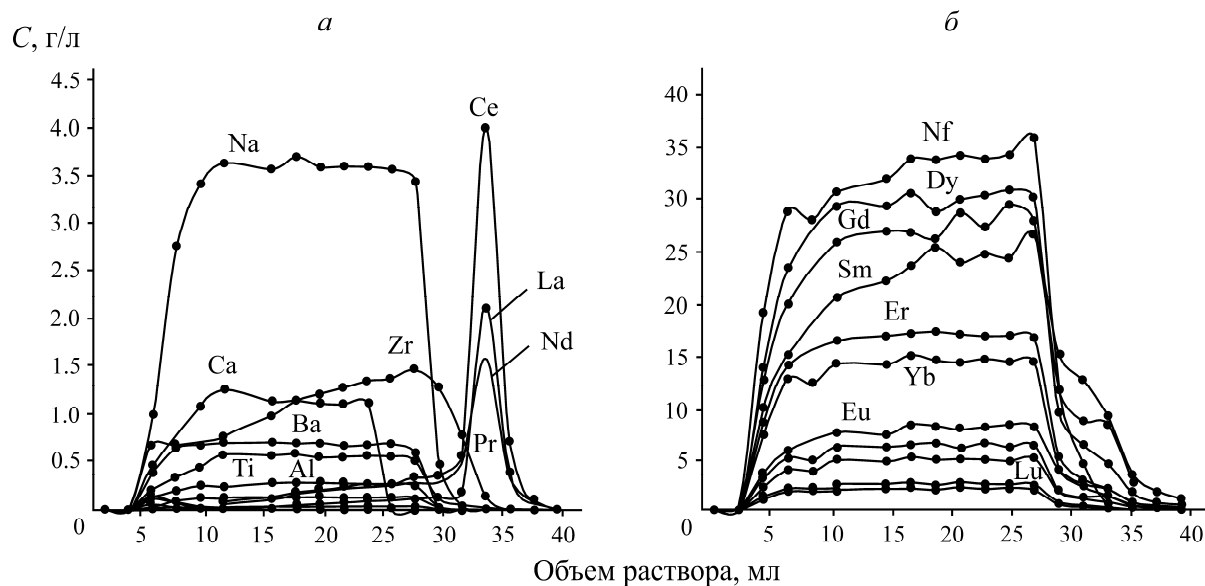


Рис. 1. Кривые элюции продуктивного раствора азотнокислого выщелачивания через гранулированный сорбент DOWEX 1x-8

При использовании в качестве сорбента смолы PCA 433 получены схожие с DOWEX 1x-8 результаты. В суммарную селективную фракцию удалось извлечь на смолу 75.3 % от суммы содержания РЗМ (75.8 % Ce, 80.6 % La, 64.5 % Pr, 46.5 % Nd, 59.5 % Zr), при отборе фракций элюата с 22 по 30 (с 0.88 по 1.20 объема колонки). При элюировании насыщенной по ценному компоненту колонки дистиллированной водой (обратный эксперимент) извлечение циркония со смолы составило 29.9 %, лантана — 32, церия — 20, празеодима — 18 %. Для доизвлечения Zr, La и Ce со смолы и достижения заявленных показателей сорбционная колонка элюировалась 1 н раствором азотной кислоты в количестве 10 колоночных объемов.

Экспериментальные данные, полученные для сильнокислого катионита Purolite C160 и хелатной смолы Puromet MTS9500, показали, что в условиях насыщения колонки по ценному компоненту (Σ РЗМ) извлечение циркония на катионит C160 составило $\sim 83\%$, при этом на смолу адсорбировалось 55–85 % сопутствующих элементов (80 % Fe, 85 % Mn, 83 % Ca, 55 % Al, 67 % Na). Для сорбента Puromet MTS9500 в тех же условиях извлечение Zr на смолу составило 99 %, сопутствующих элементов — 20–95 % (21 % Na, 95 % Al, 28 % Ca, 38 % Mn, 99 % Fe). Поскольку использование Puromet MTS9500 позволило достичь более высоких показателей по извлечению ценных компонентов на смолу, дальнейшие исследования направлены на поиск эффективных десорбирующих растворов для селективного извлечения РЗМ и прочих сорбированных элементов.

При десорбции способ и скорость подачи элюентов аналогичны использованным в процессе подачи растворов на сорбент, объем пропущенного десорбционного раствора равен 5–10 объемам смолы (колоночным объемам). Ниже приведены десорбирующие растворы и их молярности, моль/л:

H ₂ SO ₄	0.10	0.25	0.5	10.0	2.0	5.0	10.0	—
HNO ₃	0.25	0.50	1.0	2.0	3.0	5.0	5.0	8.0
HCl	0.25	0.50	1.0	2.0	4.0	6.0	—	—
NH ₄ HF ₂	0.25	0.50	1.0	2.0	3.0	5.0	—	—
Лимонная кислота	0.25	0.40	0.8	1.5	2.0	—	—	—
Щавелевая кислота	0.20	0.40	0.8	1.5	2.0	—	—	—

На рис. 2 представлены результаты извлечения сопутствующих примесных элементов и потерь РЗМ от концентрации элюентов.

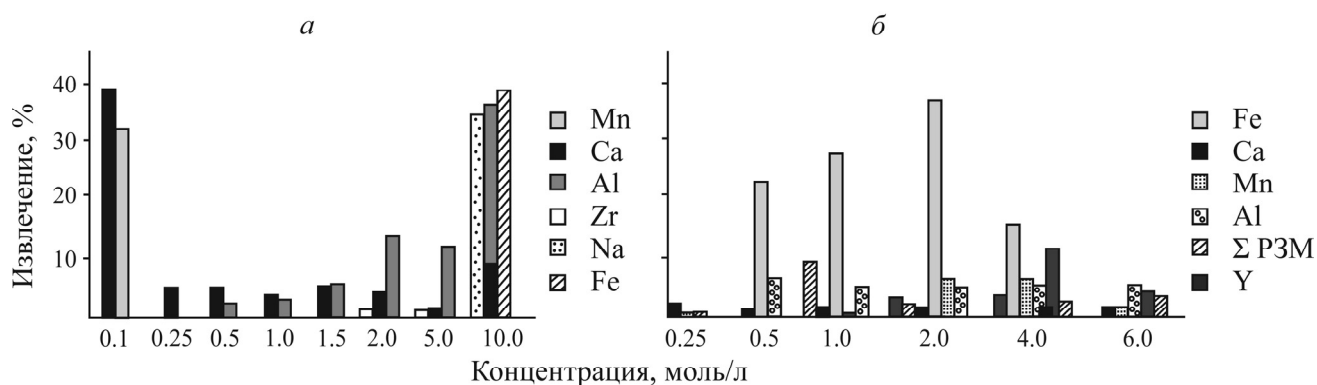


Рис. 2. Извлечение сопутствующих примесных элементов и потерь РЗМ от концентрации элюентов: а — H₂SO₄; б — HCl

Лимонная и щавелевая кислоты показали неэффективность в процессе десорбции сорбированных Puromet MTS9500 элементов. Использование 0.25 М раствора бифторида аммония NH₄HF₂ позволило извлечь 98.9 % циркония без потерь РЗМ. Серная кислота H₂SO₄ с концентрацией 0.1 моль/л — эффективный элюирующий раствор для Ca и Mn: при пропускании через колонку пяти колоночных объемов (150 мл) в раствор переходит 34 и 33 % соответственно. В тех же условиях серная кислота с концентрацией 10 моль/л обуславливает переход в раствор 35 % Na, 39 % Ca, 37 % Fe и 38 % Al. При этом потери РЗМ с элюатом раствора 0.1 М H₂SO₄ — 0.5 % от сорбированного на смолу, с 10 М раствором H₂SO₄ — 1.7 %.

Использование в качестве элюента 0.2 М щавелевой кислоты позволило извлечь в раствор со смолы 97.2 % Na без потерь РЗМ (концентрация РЗМ в элюате ниже пороговой концентрации обнаружения методом 0.05 ppm). Соляная кислота с концентрациями 0.5–2.0 моль/л, пропущенная через колонку в количестве пяти колоночных объемов (150 мл), обуславливает переход в элюирующий раствор от 22.54 до 36.30 % Fe, в элюат переходит 2.31–9.29 % РЗМ. Концентрированные (5 и 8 М) растворы азотной кислоты HNO_3 — эффективные элюирующие агенты для РЗМ. При этом 8 М раствор более эффективен: при пропускании пяти колоночных объемов достигается извлечение 83.8 % РЗМ, тогда как 5 М обеспечивает только 9.8 % РЗМ, одновременно с ценным компонентом в 10 М азотную кислоту переходит 13.5 % Al, 8.5 % Ca.

Сорбционная схема извлечения ценных компонентов из продуктивного раствора кислотного выщелачивания эвдиалита включает в себя подачу продуктивного раствора в нативном виде на хелатный сорбент Puromet MTS9500 вплоть до его насыщения по ценному компоненту (Σ РЗЭ) и последующее извлечение с сорбента посредством ступенчатого градиентного элюирования растворами минеральных кислот в количестве 5–10 колоночных объемов с получением растворов натрия, затем кальция, марганца, железа и алюминия, после чего в раствор азотной кислоты селективно выходит Σ РЗЭ и далее цирконий — в раствор бифторида аммония. Ниже приведен состав и концентрация РЗЭ в конечном продукте десорбции РЗЭ, мг/л:

La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ
90.5	218.0	26.9	78.3	24.2	8.0	27.9	5.0	28.1	5.9	15.8	2.4	13.6	1.9	715.4

Выполнено экспериментальное обоснование применения синтетических сорбционных материалов на основе сополимеров стирола и винилпиридина с дивинилбензолом для разделения редкоземельных элементов. Помимо классических сорбентов (табл. 1), на данном этапе использовались два представителя класса твердофазных экстрагентов (ТВЭКС) на основе сополимера стирола с дивинилбензолом, в качестве активного компонента — трибутилфосфат (ТВЭКС-ТБФ) и фосфиноксид (ТВЭКС-ФОР) производства ООО “ЭКРАС”.

Классические ионообменные смолы. Результаты, полученные на смолах DOWEX 1x-8 и АВ-17х-8, представлены на рис. 3 (для наглядности концентрации тяжелых РЗЭ увеличены в 100 раз) и в табл. 2.

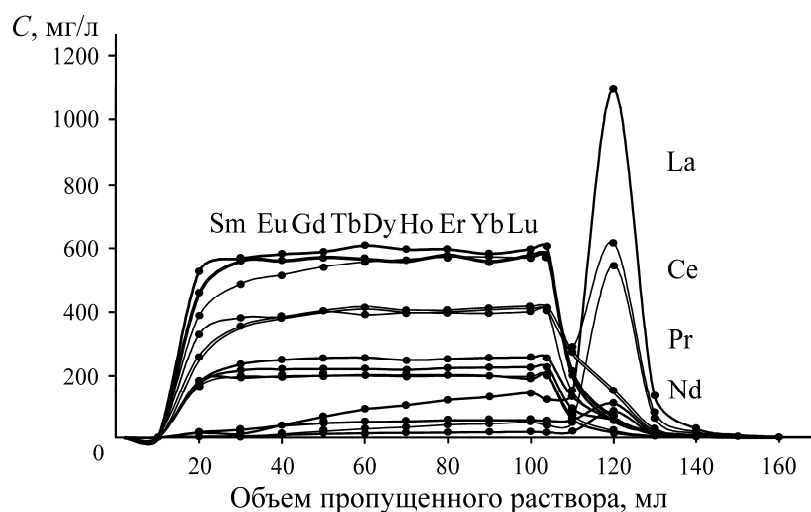


Рис. 3. Концентрационные кривые пропускания раствора РЗЭ через DOWEX 1x-8

Из рис. 3 видно, что при пропускании раствора РЗЭ через DOWEX 1х-8 тяжелые элементы Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu преимущественно проходят через колонку 0.3–3.6 объема смолы, легкие элементы Ce, La, Pr, Nd, Sm частично связываются сорбентом и выходят из колонки при элюировании дистиллированной водой (3.6–5.0 объема смолы). Оба фронта легких РЗЭ носят достаточно четкий характер, передний фронт легких РЗЭ размыт: первые порции легких РЗЭ появляются в элюате в первой трети колоночного объема. Это приводит к тому, что селективность разделения РЗЭ хотя и достаточно высока, учитывая тот факт, что описываемый эффект достигнут за одну операцию, но при этом он не достаточен, чтобы считать процесс разделения завершенным.

В табл. 2 представлен ионный состав раствора при прямом эксперименте, т. е. вышедшего из колонки при пропускании 3.5 объема смолы раствора РЗЭ (105 мл) и процентное выражение доли элемента, перешедшего в эту фракцию элюата, относительно его содержания во всем пропущенном объеме раствора. Наблюдается приоритет сорбции легких РЗЭ на сорбент при прямом эксперименте: из раствора на сорбент DOWEX 1х-8 извлекается от 70.5 до 52.5 % легких РЗЭ, при этом 29.51 % лантана, 37.69 % церия, 47.45 % празеодима, 59.55 % неодима выходят в элюат одновременно с тяжелыми РЗЭ, до 10 % которых переходит на смолу. Полученный раствор обогащается тяжелыми РЗЭ, большая их часть (80.5–98.5 %) выходят в элюат вместе с легкими РЗЭ, не сорбированными смолой.

ТАБЛИЦА 2. Выход γ РЗЭ на сорбент и концентрация C в элюате

Показатель	Элемент и $C_{исх}$, мг/л													
	La 90.5	Ce 218.0	Pr 26.8	Nd 78.3	Sm 24.2	Eu 7.9	Gd 27.8	Tb 5.4	Dy 28.1	Ho 5.8	Er 15.7	Tm 2.3	Yb 13.5	Lu 1.9
DOWEX 1х-8														
γ , %	70.5	62.3	52.6	40.45	16.1	19.9	19.0	7.7	16.0	12.0	12.2	16.2	6.6	1.0
C , мг/л	22.6	68.8	10.6	31.7	17.0	5.3	18.8	3.8	19.7	4.3	11.4	1.6	10.3	1.9
AB-17х-8														
γ , %	33.6	29.9	28.6	26.9	13.3	12.4	12.5	6.0	16.2	15.1	12.4	18.3	1.0	1.0
C , мг/л	59.7	152.6	19.1	61.1	20.6	6.6	24.2	3.9	23.4	4.9	13.7	2.1	13.6	1.9

Результаты со смолой отечественного производства марки AB-17х-8 также показали приоритет извлечения легких РЗЭ на сорбент, хотя оно и ниже, чем с DOWEX 1х-8 (28.8–33.0 %). Извлечение на сорбент тяжелых РЗЭ сопоставимо с результатами для DOWEX 1х-8, но для Tm, Yb, Lu оно ниже. Элюат, полученный в прямом опыте пропусканием через AB-17х-8 модельного раствора в объеме 260 мл, превосходит по содержанию легких РЗЭ элюат DOWEX 1х-8 в 2–3 раза (66.4 % La, 70.1 % Ce, 71.4 % Pr, 73.1 % Nd).

Особого внимания заслуживают результаты с использованием сорбента ВП-3АП. Его отличие от дивинилбензольных состоит в самой матрице сорбента, представляющей собой сополимер 4-винилпиридина и дивинилбензола, в качестве функциональной группы выступает диметилсульфат [15]. Результаты, полученные с помощью смолы ВП-3АП, представлены на рис. 4 и в табл. 3 (γ — выход, C — концентрации РЗЭ). Сорбент ВП-3АП насыщается преимущественно легкими РЗЭ: на смолу извлекается 64.8 % празеодима, 43.5 % неодима, 83.3 % церия и 73.4 % лантана.

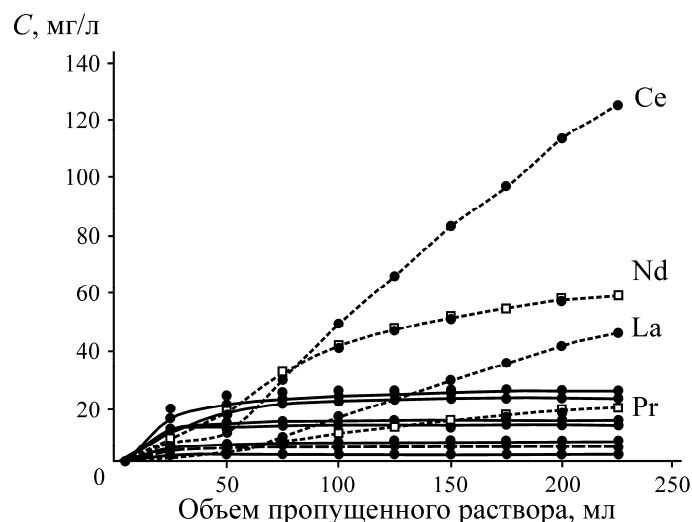


Рис. 4. Концентрационные кривые пропускания раствора РЗЭ через сорбент ВП-3АП

ТАБЛИЦА 3. Сорбция РЗЭ на смоле ВП-3АП

Показатель	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Первый цикл														
γ , % на смоле	73.4	83.3	64.8	43.5	8.6	6.9	18.0	11.3	22.6	22.0	11.2	12.4	13.6	15.9
γ , % в растворе	26.5	16.6	35.1	56.2	91.3	93.0	81.9	88.6	77.3	77.9	88.7	87.5	86.3	84.0
$C_{исх}$, мг/л	90.5	218.0	26.9	78.3	24.2	8.0	27.8	5.4	28.1	5.9	15.8	2.4	13.6	1.9
$C_{элюат}$, мг/л	23.9	36.2	9.4	44.1	22.1	7.5	22.8	4.5	21.8	4.7	13.9	2.1	11.7	1.1
Второй цикл														
γ , % в растворе	25.5	40.7	57.3	55.9	91.3	93.1	91.1	98.6	97.3	97.9	98.7	97.5	96.3	98.0
$C_{элюат}$, мг/л	6.1	17.8	5.4	24.6	20.1	6.9	21.0	4.4	21.1	4.6	13.7	2.1	11.2	1.0

Тяжелые РЗЭ проходят через колонку, связываясь со смолой не более чем на 10–15 % от суммарного содержания в объеме пропущенного раствора. На выходе из сорбционной колонки получается элюат, значительно обедненный легкими РЗЭ: концентрация легких РЗЭ в элюате снижается в 1.7–3.4 раза.

Для улучшения параметров разделения на смоле ВП-3АП раствор, полученный при пропускании 10 колоночных объемов (табл. 3, первый цикл), повторно пропускался через тот же объем свежего сорбента (второй цикл). Повторное пропускание усредненного элюата раствора позволило снизить концентрации легких РЗЭ в 1.7–3.9 раза, однако не привело к их полному удалению.

Твердофазные экстрагенты. Концентрационные кривые, полученные при пропускании модельного раствора РЗЭ через твердофазные экстрагенты ТВЭКС-ТБФ и ТВЭКС-ФОР, показали, что они не поглощают ценный компонент из концентрированных растворов азотной кислоты. Для установления возможности извлечения РЗЭ из менее концентрированных растворов проведены эксперименты по определению влияния концентрации азотной кислоты на поглощение РЗЭ из ее раствора твердофазными экстрагентами ТВЭКС в статическом режиме. Результаты экспериментов по адсорбции РЗЭ из модельных растворов в 1, 3, 5, 10 % азотной кислоте и модельных растворов РЗЭ с pH 1.5, 3.0 и 5.4 в статических условиях показали, что максимальное поглощение РЗЭ экстрагентами ТВЭКС соответствует 10 % азотной кислоте (рис. 5).

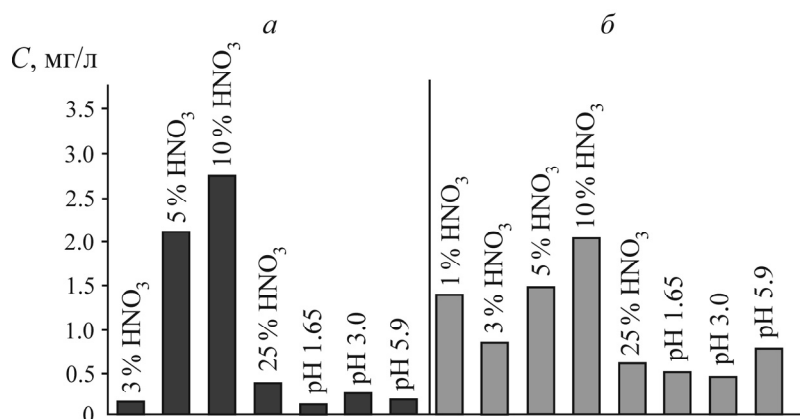


Рис. 5. Влияние концентрации азотной кислоты на поглощение РЗЭ из раствора: а — ТВЭКС-ТБФ; б — ТВЭКС-ФОР

Выполнены динамические эксперименты с раствором РЗЭ в 10 % азотной кислоте и выявлено, что ТВЭКС-ТБФ не поглощает РЗЭ в динамических условиях даже из 10 % азотной кислоты. Результаты для ТВЭКС-ФОР представлены в табл. 4. В условиях динамического эксперимента ни одна из подгрупп не имела выраженного приоритета сорбции на сорбент / выхода в элюат.

ТАБЛИЦА 4. Сорбция ионов РЗЭ на сорбент ТВЭКС-ФОР и концентрация РЗЭ в элюате

Показатель	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
γ , % на смоле	13.3	20.5	26.9	86.8	34.4	42.5	30.9	36.9	48.7	43.6	54.1	36.5	45.9	18.9
γ , % в растворе	86.7	79.5	73.1	13.2	65.6	57.5	69.1	63.1	51.3	57.4	45.9	63.5	54.1	86.7
$C_{\text{исх}}$, мг/л	90.5	218.0	26.9	78.3	24.2	8.0	27.8	5.4	28.1	5.9	15.8	2.4	13.6	1.9
$C_{\text{элюат}}$, мг/л	77.8	173.3	19.6	67.9	15.9	4.5	19.2	3.2	14.4	3.4	7.2	1.5	7.3	1.6

ВЫВОДЫ

Экспериментальные исследования применимости органических полимерных сорбентов на основе свёрнутого полистирола: сильноосновные аниониты марок DOWEX 1х-8, PCA-433, сильноосновный катионит Purolite C160 и хелатная смола Puromet MTS9500 показали, что для выделения ценных компонентов из продуктивного раствора азотнокислого выщелачивания эвдиалита в его нативном состоянии наиболее перспективны Puromet MTS9500 и Purolite C160. Для смолы Puromet MTS9500 предложена схема ступенчатого градиентного элюирования сорбента, позволяющая получить на выходе раствор Zr с концентрацией 4.1 г/л при его извлечении в раствор 97.7 % и раствор Σ РЗЭ с концентрацией 0.75 г/л при извлечении смолы РЗЭ — 81.1 %.

Применительно к задаче разделения Σ РЗМ на подгруппы изучена винилпиридиновая смола марки ВП-3АП и твердофазные экстрагенты ТВЭКС-ФОР, ТВЭКС-ТБФ. При использовании смолы марки ВП-3АП за две операции последовательного пропускания модельного раствора РЗЭ через неподвижный слой сорбента концентрация легких РЗЭ (Ce, La, Nd, Pr) снижается в 3.2–14.8 раз (68–93 %) относительно их содержания в исходном растворе, при этом РЗЭ тяжелой группы связываются с сорбентом только на 8–10 % и преимущественно переходят в элюат. Твердофазные экстрагенты ТВЭКС-ФОР и ТВЭКС-ТБФ неэффективны при разделении Σ РЗЭ из азотнокислых растворов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Методы** извлечения и разделения редкоземельных и редких элементов. — М.: Гиредмет, 1987. — 144 с.
2. **Пласкин И. Н.** Ионный обмен и экстракция в процессах переработки руд // Ионообменные и экстракционные методы в химико-обогащительных процессах. — М.: Наука, 1965. — С. 3–13.
3. **Исследование** процессов получения редких и редкоземельных металлов и их соединений. — М.: Гиредмет, 1989. — 158 с.
4. **Исследования** в области технологии и металлургии редких металлов. — М.: Гиредмет, 1988. — 120 с.
5. **Локшин Э. П., Тареева О. А., Иваненко В. И., Корнейков Р. И., Елизарова И. Р.** Исследование сорбционного извлечения редкоземельных элементов из серно-кислых растворов // Хим. технология. — 2011. — № 12. — С. 749–754.
6. **Химические,** сорбционные и экстракционные методы получения и очистки редких металлов. — М.: Гиредмет, 1978. — 135 с.
7. **Хамизов Р. Х., Крачак А. Н.** Сорбционное концентрирование и выделение РЗЭ из экстракционной фосфорной кислоты // Переработка и утилизация попутных фосфористых соединений и извлечение редкоземельных металлов в производстве минеральных удобрений. — М.: НИУИФ, 2011. — 180 с.
8. **Даванков В. А., Цюрупа М. П., Блиникова З. К.** Разделение модельной смеси $\text{CaCl}_2\text{--KCl}$ на нейтральном нанопористом сверхсшитом полистироле в статических и динамических условиях // Журн. физ. химии. — 2008. — Т. 82. — № 3. — С. 519–524.
9. **Davankov V. A., Tsyurupa M. P., and Alexienko N. N.** Selectivity in preparative separations of inorganic electrolytes by size exclusion chromatography on hypercrosslinked polystyrene and microporous carbons, J. Chromatogr. A, 2005, Vol. 1100, No. 1. — P. 32–39.
10. **Davankov V. A. and Tsyurupa M. P.** Preparative frontal size exclusion chromatography of mineral ions on neutral hypercrosslinked polystyrene, J. Chromatogr. A, 2005, Vol. 1087, No. 1. — P. 3–12.
11. **Элрих Г. В., Лисичкин Г. В.** Сорбция в химии редкоземельных элементов // Журн. общей химии. — 2008. — Т. 87. — Вып. 6. — С. 1001–1018.
12. **Чантурия В. А., Миненко В. Г., Самусев А. Л., Копорулина Е. В., Рязанцева М. В.** Извлечение циркония и редкоземельных элементов из растворов выщелачивания эвдиалитового концентрата // ФТПРПИ. — 2020. — № 4. — С. 138–148.
13. **Чантурия В. А., Миненко В. Г., Копорулина Е. В., Рязанцева М. В., Самусев А. Л.** Влияние различных кислот на эффективность извлечения циркония и редкоземельных металлов при выщелачивании эвдиалитового концентрата // ФТПРПИ. — 2019. — № 6. — С. 140–151.
14. **Чантурия В. А., Бунин И. Ж., Рязанцева М. В., Чантурия Е. Л., Самусев А. Л., Копорулина Е. В., Анашкина Н. Е.** Интенсификация процесса выщелачивания эвдиалитового концентрата при воздействии наносекундных импульсов высокого напряжения // ФТПРПИ. — 2018. — № 4. — С. 134–144.
15. **Лызова Е. В.** Выделение и концентрирование актинидов из азотнокислых растворов с применением ионообменных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Озерск, 2015. — 20 с.

Поступила в редакцию 05/II 2024

После доработки 15/IV 2024

Принята к публикации 17/V 2024