

Научная статья

УДК 622.765+541.183.24

<http://doi.org/10.17072/2223-1838-2024-2-52-61>

Изучение осаждения и флотационного извлечения ионов скандия алкилбензолсульфокислотой и оксифосом Б

Светлана Александровна Заболотных¹, Светлана Александровна Денисова², Марьям Марлисовна Хузягулова²

¹«Институт технической химии Уральского отделения Российской академии наук», Пермь, Россия

²Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

Аннотация. Изучены процессы осаждения и флотационного извлечения ионов скандия (III) анионогенными ПАВ алкилбензолсульфокислотой и оксифосом Б при различных концентрациях и соотношениях компонентов. Рассмотрено влияние кислотности среды и времени перемешивания на извлечение ионов металла. Осадок скандия с алкилбензолсульфокислотой выделен препаративно и проанализирован методами термогравиметрического, элементного и химического анализа, установлен состав соединения. Найдены условия количественного флотационного извлечения ионов скандия (III) с оксифосом Б.

Ключевые слова: скандий, алкилбензолсульфокислота, оксифос Б, осаждение, флотация

Для цитирования: Заболотных С.А., Денисова С.А., Хузягулова М.М. Изучение осаждения и флотационного извлечения ионов скандия алкилбензолсульфокислотой и оксифосом Б // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2024. Т. 14, № 2. С. 52–61. <http://doi.org/10.17072/2223-1838-2024-2-52-61>.

Original Article

<http://doi.org/10.17072/2223-1838-2024-2-52-61>

Study of precipitation and flotation recovery of scandium ions by alkylbenzene sulphonic acid and oxyphos B

Svetlana A. Zabolotnykh¹, Svetlana A. Denisova², Maryam M. Khuzyagulova²

¹«Institute of Technical Chemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences», Perm, Russia

²Perm State University, Perm, Russia

Abstract. The processes of precipitation and flotation recovery of scandium (III) ions by anionogenic surfactants alkylbenzenesulfonic acid and oxyphos B at different concentrations and components ratios have been studied. The influence of medium acidity and stirring time on the metal ion extraction was considered. The precipitate of scandium with alkylbenzenesulfonic acid was isolated preparatively and analysed by methods of thermogravimetric, elemental and chemical analysis, the composition of the compound was established. Conditions for quantitative flotation of scandium (III) ions with oxyphos B were found.

Keywords: scandium, alkylbenzenesulfonic acid, oxyphos B, precipitation, flotation

For citation: Zabolotnykh, S.A., Denisova, S.A. and Khuzyagulova, M.M. (2024) “Study of precipitation and flotation recovery of scandium ions by alkylbenzene sulphonic acid and oxyphos B”, *Bulletin of Perm University. Chemistry*, vol. 14, no. 2, pp. 52–61. <http://doi.org/10.17072/2223-1838-2024-2-52-61>.



Повышенное внимание исследователей скандий начал привлекать с развитием микроэлектроники, ракетостроения и других новейших областей техники. Известно использование различных соединений скандия при создании высокотемпературной керамики, квантово-механических усилителей, лазеров, люминофоров, эмиссионных материалов, диэлектриков, твердых электролитов, мощных осветительных галогенных ламп, катализаторов. Металлический скандий и его сплавы используются в самолето- и ракетостроении, водородной энергетике при создании термоядерных реакторов и оборудования нефтяных хранилищ, для создания мишеней нейтронных генераторов, фильтров для получения квазимонохроматического пучка нейтронов [1, 2].

Скандий относится к группе рассеянных элементов: собственных месторождений скандийсодержащие минералы не образуют [3]. Поэтому источником скандия служат промышленные отходы, например, гидролизная серная кислота производства диоксида титана, переработка которых осуществляется, в основном, гидрометаллургическими методами, такими как экстракция и ионный обмен [4–7]. Однако проблема поиска новых способов извлечения скандия является актуальной. Одним из наиболее перспективных методов является ионная флотация, достоинствами которой являются: избирательность, высокая скорость проведения процесса, эффективность при низких исходных концентрациях металла. Кроме этого, применение флотации позволяет избежать образования объёмных осадков и использования дорогостоящих экстрагентов [8].

В качестве реагентов для флотации катионов металлов чаще всего выбирают анионные ПАВ

(АПАВ), способные образовывать малорастворимые комплексы с металлом, и стабилизировать гетерогенную систему для удаления образующегося пенного продукта из раствора, например, додецилсульфат натрия [9]. Ранее было установлено, что промышленно-выпускаемое анионогенное поверхностно-активное вещество – алкилбензолсульфокислота (АБСК), также способно образовывать осадки с такими ионами как La^{3+} , Sm^{3+} и Tb^{3+} и может использоваться для флотации [10]. Возможность использования оксифоса Б в качестве реагента для флотационного извлечения некоторых ионов металлов рассматривалась ранее в работе [11].

В связи с этим представляло интерес изучить перспективность использования анионогенных ПАВ алкилбензолсульфокислоты и оксифоса Б для флотационного извлечения ионов скандия.

Объекты и методы исследования

Реактивы. В работе использовали анионогенные ПАВ:

- Алкилбензолсульфокислота (АБСК, ТУ 2481-026-05766480-2006, $\text{C}_n\text{H}_{2n+1}(\text{C}_6\text{H}_4)\text{SO}_3\text{H}$, где $n=12-14$, м.м.=320,9 г/моль) [12].

- Калий бис(алкилполиоксоэтилен) фосфат (оксифос Б, ТУ 2484-344-05763441-2001, $[\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{O}(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_m]_2\text{POOK}$, $n=8-10$, $m=6$)

Водные растворы ПАВ с концентрацией 0,1 моль/л готовили из навески. Точную концентрацию АБСК определяли титрованием раствором NaOH с индикатором бромкрезоловым зеленым [13]. Растворы с концентрацией 0,01; 0,001 моль/л получали соответствующим разбавлением.

В качестве источника ионов скандия (III) использовали сульфат скандия квалификации

ч.д.а., 0,1 моль/л раствор готовили растворением навески в воде, точную концентрацию устанавливали комплексометрическим титрованием с ксиленоловым оранжевым в присутствии уротропинового буферного раствора с рН 4,10 [14]. Растворы с меньшей концентрацией получали соответствующим разбавлением.

Раствор гидроксида натрия NaOH с концентрацией 1,0 моль/л готовили из навески препарата квалификации ч.д.а., 0,1 моль/л раствор получали соответствующим разбавлением и стандартизировали по 0,1 моль/л раствору HCl, приготовленному из фиксанала.

Серная кислота, концентрированная (х.ч., $\rho=1,832$ г/мл). Раствор 5,0 моль/л (1,290 г/мл) готовили разбавлением концентрированной кислоты, растворы с концентрацией 1,0 и 0,1 моль/л готовили последовательным разбавлением более концентрированного раствора.

Для изучения процессов осаждения в химический стакан на 50 мл вносили 2,0 мл раствора скандия (III), раствор АБСК (оксифоса Б) в объеме, соответствующем стехиометрическому соотношению Sc^{3+} к АПАВ от 1:1 до 1:3, и доводили дистиллированной водой до объема 20,0 мл. Полученную смесь перемешивали с помощью мешалки в течение 1–7 мин. После перемешивания раствор отстаивали в течение 10 мин. Обращали внимание на внешний вид смеси (вид осадка, наличие суспензии). Раствор с осадком фильтровали через фильтр «синяя лента» и измеряли $\text{pH}_{\text{равн}}$ на иономере Мульти-тест ИПЛ-101 (СЕМИКО НПП, Россия). Для определения остаточного содержания иона металла в растворе над осадком собирали фильтрат в колбу на 50 мл и доводили до метки водой.

Содержание скандия в фильтрате определяли спектрофотометрически с хромазуролом S по методике [15] на спектрофотометре СФ-2000 (Спектр, Россия). Степень осаждения рассчитывали по формуле:

$$S, \% = 100 \cdot \left(1 - \frac{C_{\text{PЗЭ(фильтрат)}}}{C_{\text{PЗЭ(введенное)}}} \right).$$

Осадок ионов скандия (III) с АБСК выделяли препаративно, высушивали на воздухе до постоянной массы, и исследовали на термоанализаторе TGA/DSC 1 (Mettler Toledo, Швейцария). Элементный анализ проводили на элементном анализаторе Vario EL Cube (Elementar, Германия).

Испытания по ионной флотации осуществляли на механической флотомашине ФМЛ 0,3 с объемом камеры 300 мл. Во флотационную ячейку вносили 200 мл 0,001 моль/л раствора Sc^{3+} , вводили рассчитанное количество 0,1 моль/л раствора АБСК (оксифоса Б), выдерживали в течение 1 мин для созревания осадка, включали воздух и собирали пену, содержащую сублат. По окончании флотации в камерном продукте определяли $\text{pH}_{\text{равн}}$ и остаточное содержание ионов скандия (III) спектрофотометрически по формуле, аналогичной степени осаждения.

Результаты и их обсуждение

Осаждение ионов скандия (III) АБСК и оксифосом Б. В отсутствие кислот и щелочей при взаимодействии ионов скандия с алкилбензолсульфокислотой или оксифосом Б образуются белые аморфные осадки. Осадок с АБСК растворим в спирте, 1,0 моль/л серной кислоты и ледяной уксусной кислоты, с оксифосом Б – в 9,5 моль/л серной кислоты и ледяной уксусной кислоты.

Осадок ионов скандия (III) с АБСК, полученный при смешивании компонентов в соотношении 1:3, выделен препаративно и проанализирован методами элементного анализа и термогравиметрии. Согласно проведенным ис-

следованиям, при отсутствии щелочи образующийся осадок представляет собой простую соль катиона скандия и трех анионов алкилбензолсульфокислоты, $\text{Sc}(\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{C}_6\text{H}_4\text{SO}_3)_3$. Результаты исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1.

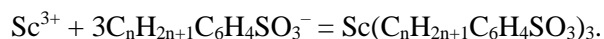
Элементный состав осадка скандия (III) с АБСК

Элемент	Sc	C	H	S
Расчетное значение*	4,75	64,50	8,06	9,58
Экспериментальное значение	4,48**	65,89	9,24	9,52

*М.м. алкилбензолсульфонат-иона считали равной 319,9 г/моль.

** Из данных термогравиметрического анализа. Считали, что образец полностью переходит в Sc_2O_3 .

Таким образом, полученный осадок представляют собой соль, образующуюся по уравнению:



Для установления возможности флотационного извлечения скандия в виде труднорастворимых соединений с предложенными АПАВ предварительно изучены процессы его осаждения при различных соотношениях компонентов, времени перемешивания и pH.

Оптимальное время смешения растворов для обоих ПАВ составило 1 мин, при более длительном перемешивании осадки частично растворяются.

В табл. 2 представлены результаты изучения осаждения Sc (III) алкилбензолсульфокислотой и оксифосом Б в зависимости от соотношений компонентов. Исследования показали, что сте-

пень осаждения ионов скандия (III) с АБСК из растворов с концентрацией меньше, чем $8,25 \cdot 10^{-3}$ моль/л не превышает 40% и практически не зависит от соотношения компонентов. Из растворов с концентрацией $8,25 \cdot 10^{-3}$ моль/л максимальная степень осаждения Sc^{3+} наблюдается при трехкратном избытке АБСК по отношению к металлу и составляет 74 %. В зависимости от соотношения Sc^{3+} и АБСК и концентрации растворов $\text{pH}_{\text{равн}}$ фильтрата после осаждения находится в интервале от 1,9 до 3,1.

Степень осаждения ионов скандия (III) с оксифосом Б максимальна при соотношении компонентов 1:3 и достигает 85% из $8,25 \cdot 10^{-3}$ моль/л растворов и 95% из растворов с концентрацией $8,25 \cdot 10^{-4}$ моль/л. Значения $\text{pH}_{\text{равн}}$ фильтрата после осаждения Sc^{3+} находится в интервале от 2,2 до 4,2.

Таблица 2.

Зависимость степени осаждения (S, %) ионов Sc (III) с АБСК и оксифосом Б от мольного соотношения компонентов ($\tau=1$ мин)

АПАВ	n(Sc) : n(АПАВ)	C(Sc^{3+}), моль/л			
		$8,25 \cdot 10^{-3}$		$8,25 \cdot 10^{-4}$	
		$\text{pH}_{\text{равн}}$	S, %	$\text{pH}_{\text{равн}}$	S, %
АБСК	1:1	2,6	31,35	3,1	40,14
	1:2	2,0	58,88	2,7	37,31
	1:3	1,9	74,05	2,6	38,12
Оксифос Б	1:1	2,4	45,44	4,2	55,70
	1:2	2,3	66,63	4,0	73,21
	1:3	2,2	85,00	3,8	95,40

При соотношении $Sc : \text{АБСК} = 1:1$ и $Sc : \text{оксифос} = 1:3$ изучена зависимость осаждения ионов скандия (III) от концентрации гидроксид-ионов. При выполнении исследований придерживались следующего порядка сливания: 1) 2 мл 0,1 моль/л раствора Sc^{3+} ; 2) эквивалентное количество АПАВ; 3) соответствующее количество раствора NaOH; 4) вода до общего объема 20 мл.

Как видно из рис. 1, с увеличением концентрации щелочи в смеси степень осаждения ионов скандия (III) с обоими ПАВ увеличивается, и при pH выше 5 приближается к 90% для АБСК. Из смесей с оксифосом Б осаждение Sc^{3+} выше 98% наблюдается при pH выше 2,5.

Известно, что ионы скандия начинают осаждаться из растворов сульфатов (0,0025 М) при pH 4,8–4,9 в виде основных солей, осаждение

заканчивается при pH 5,10 [1]. Поэтому резкое увеличение количества осадка и изменение его структуры позволяют предположить, что в области pH около 5 происходит осаждение ионов скандия с АБСК в виде основных солей. Основные соли переходят в гидроокиси при достижении концентрации щелочи, эквивалентной количеству скандия. Поэтому при pH выше 5 высокие значения степени извлечения объясняются осаждением гидроокиси скандия. Более эффективное осаждение Sc^{3+} оксифосом Б по сравнению с АБСК объясняется тем, что взаимодействие ионов $Sc(III)$ с оксифосом Б может происходить не только за счет образования простых солей, но и достаточно прочных комплексных соединений. Введение в смеси серной кислоты приводит к постепенному растворению осадка и уменьшению степени осаждения.

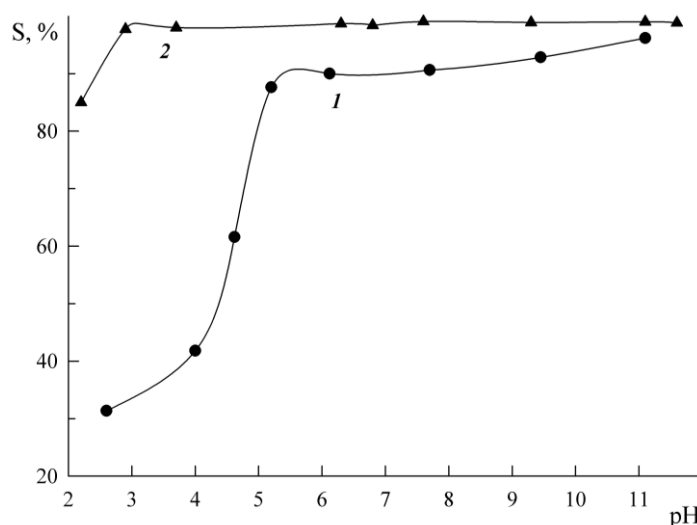


Рис. 1. Зависимость степени осаждения (S, %) ионов Sc (III) АБСК (1) и оксифосом Б (2) от pH среды ($C_{Sc} = 8,25 \cdot 10^{-3}$ моль/л, $Sc^{3+} : \text{АБСК} = 1:1$, $Sc^{3+} : \text{Оксифос Б} = 1:3$, $\tau = 1$ мин).

Флотационное извлечение ионов скандия (III) с АБСК и оксифосом Б. На рисунках 2 и 3 представлены результаты флотационного извлечения Sc^{3+} алкилбензолсульфокислотой и оксифосом Б в зависимости от соотношения компонентов и pH среды.

Согласно результатам исследований в кислой среде ($pH_{\text{равн}} 2,77-3,27$) флотация ионов скандия (III) раствором АБСК не превышает 43 %. При увеличении количества АБСК до трехкратного мольного избытка по отношению к ионам скандия наблюдается уменьшение сте-

пени извлечения металла, причем при соотношениях 1:2 и 1:3 степень извлечения почти не отличается. Введение более чем трехкратного избытка АБСК приводит к обильному пенообразованию, что плохо сказывается на качестве флотации. В присутствии щелочи флотация ионов скандия АБСК максимальна при соотношении компонентов 1:1 в интервале $\text{pH}_{\text{равн}}$ 4,8–5,0. Это говорит о том, что скандий флотируется с АБСК в виде основных солей. При более высоких значениях pH флотация скандия

падает за счет увеличения концентрации плохо флотируемых гидроксидов. Эффективность извлечения ионов скандия (III) при введении OH^- -ионов зависит от соотношения $\text{Sc} : \text{Оксифос Б}$. При соотношении компонентов 1:1 максимальное извлечение Sc^{3+} (94%) происходит при введении двукратного избытка OH^- -ионов по отношению к металлу ($\text{pH}_{\text{равн}}$ 6,4–6,7). Поэтому можно предположить, что в этом случае скандий флотируется в виде соединения $\text{Sc}(\text{OH})_2\text{R}$, где R – это анион оксифоса Б.

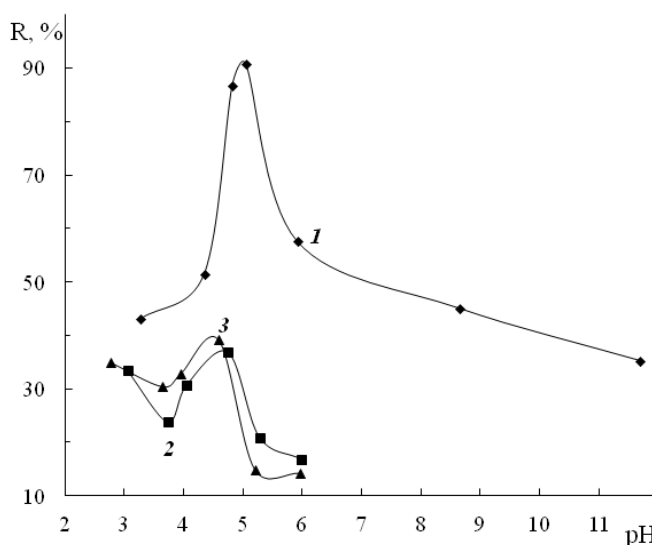


Рис. 2. Зависимость флотационного извлечения ионов Sc (III) с АБСК от pH среды при различных соотношениях Sc^{3+} : АБСК: 1 – 1:1; 2 – 1:2; 3 – 1:3 ($C_{\text{Sc}} = 8,25 \cdot 10^{-4}$ моль/л; $\tau_{\text{фл}} = 5$ мин).

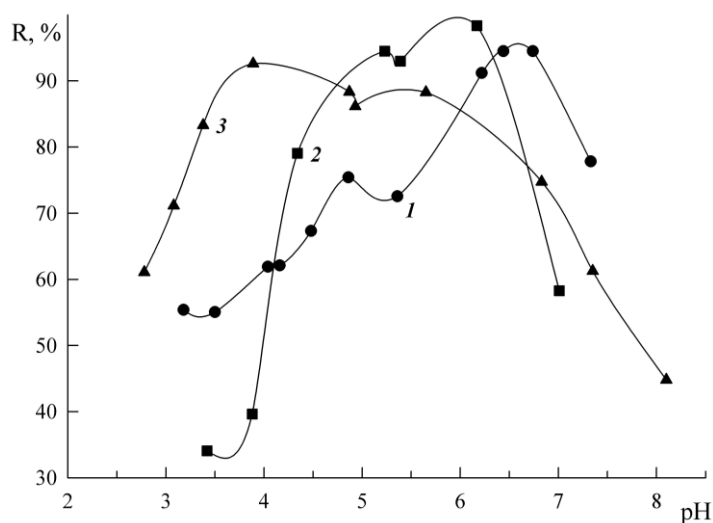


Рис. 3. Зависимость флотационного извлечения ионов Sc (III) с оксифосом Б от pH среды при различных соотношениях Sc^{3+} : оксифос Б: 1 – 1:1; 2 – 1:2; 3 – 1:3 ($C_{\text{Sc}} = 8,25 \cdot 10^{-4}$ моль/л; $\tau_{\text{фл}} = 5$ мин)

Наиболее высокая степень извлечения ионов скандия (III) (94–98%) при соотношении $\text{Sc} : \text{ПАВ} = 1:2$ наблюдается при меньшем значении $\text{pH}_{\text{равн}}$, равном 5,2–6,2. В этом случае, вероятно, извлечение происходит в виде основной соли $\text{Sc}(\text{OH})\text{R}_2$. При значениях pH более 6,5 наблюдается резкое падению степени флотационного извлечения.

В присутствии трехкратного избытка оксифоса Б максимум извлечения Sc^{3+} составил 93% при pH 3,9, из чего можно предположить, что извлечение скандия (III) происходит в виде соединения ScR_3 . В более кислой среде флотация целевого продукта снижается вследствие растворения сублата, в более щелочной – из-за образования малофлотируемых гидроксидов. Повышение концентрации АПАВ в смесях приво-

дит к обильному пенообразованию и снижению качества флотации.

Заключение

Установлено, что из двух исследованных АПАВ для флотации ионов скандия (III) наиболее перспективным реагентом является оксифос Б, что объясняется его способностью к образованию координационных связей между атомами кислорода и металлом. В зависимости от соотношения $\text{Me} : \text{ПАВ}$ флотация скандия оксифосом Б на уровне 86–98 % происходит в интервале pH от 3,5 до 6,7. Важным преимуществом использования оксифоса Б в процессах извлечения ионов $\text{Sc}(\text{III})$ является возможность их количественного осаждения и флотации из кислых растворов.

Список источников

1. Морачевский Ю.В., Церковническая И.А. Основы аналитической химии редких элементов. Л.: ЛГУ им. А.А. Жданова, 1980. 207 с.
2. Семенов С.А., Резник А.М., Букин В.И. Технологические аспекты сырьевой базы скандия // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 1997. № 6. С. 23–25.
3. Шахно И.А., Шевцова З.Н., Федоров П.И., Коровин С.С. Химия и технология редких и рассеянных элементов. М.: Высшая школа, 1976. 360 с.
4. Коровин С.С., Зими́на Г.В., Резник А.М., Букин В.И., Корнюшко В.Ф. Редкие и рассеянные элементы. Химия и технология. М.: МИСИС. 1996, 438 с.
5. Лысенко О.А., Костикова Г.В. Экстракционное рафинирование скандия нейтральными фосфорорганическими соединениями из хлоридно-нитратных растворов // Известия СПбГТИ (ТУ). 2022. № 61 (87). С. 27–32.
6. Абдурахмонов О.Э., Семенов С.А., Соколова Ю.В. Экстракционное извлечение скандия из сернокислых растворов выщелачивания красных шламов алюминиевого производства // Цветные металлы. 2022. № 4. С. 33–39.
7. Kuzmin V.I., Kuzmina A.A., Kalyakin S.N., Mulagaleeva M.A. Extraction of scandium halides with mixtures of tributylphosphate and molecular iodine // Journal of Siberian Federal University. Chemistry. 2020. № 13(3). P. 418–429.
8. Джевага Н.В., Лобачева О.Л. Ионная флотация – перспективный способ переработки редкометалльного сырья // Естественные и математические науки в современном мире. 2013. Вып. 8. С. 134–138.

9. Lutsky D.S., Dzhevaga N.V., Lobacheva O.L. Extraction, Removal and Separation of Rare-Earth Elements in Aqueous Solutions // Natural and Technical Sciences. 2019. № 4 (130), pp. 17–21.
10. Zabolotnykh S.A., Denisova S.A., Nagovitsyn R.R., Vaulina V.N. Alkylbenzenesulfonic acid as a reagent for flotation extraction of lanthanum (III), samarium (III) and terbium (III) ions // ChemChemTech. 2023. V. 66. № 3. P. 45–51.
11. Леснов А.Е., Кудряшова О.С., Ризванова Л.Г. Ионная флотация некоторых многозарядных катионов металлов оксифосом Б // Известия высших учебных заведений. Серия Химия и химическая технология. 2014. Т. 57. № 8. С. 40–43.
12. Абрамзон А.А., Бочаров В.В., Гаевой Г.М. Поверхностно-активные вещества // Справочник. Л.: Издательство «Химия». 1979. 376 с.
13. Заболотных С.А., Денисова С.А. Определение алкилбензолсульфокислоты в водных растворах // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2021. Т. 11. Вып. 1. С. 17–29.
14. Шварценбах Г., Флашка Г. Комплексометрическое титрование. М.: Химия, 1970. 359 с.
15. Пестов Р.Г., Денисова С.А. Изучение влияния ПАВ на спектрофотометрические характеристики лантана и скандия с некоторыми органическими реагентами // Современные аспекты химии: материалы V молодежной школы-конференции. Пермь: ПГНИУ, 2018. С. 53–54.

Информация об авторах

Светлана Александровна Заболотных, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории органических комплексообразующих реагентов, «Институт технической химии УрО РАН» (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 3), zabolotsveta@mail.ru

Светлана Александровна Денисова, кандидат химических наук, доцент кафедры аналитической химии и экспертизы, Пермский государственный национальный исследовательский университет (614068, г. Пермь, Букирева, 15), sw.denisova@yandex.ru

Хузягулова Марьям Марлисовна, студент, кафедра аналитической химии и экспертизы, Пермский государственный национальный исследовательский университет (614990, г. Пермь, Букирева, 15)

Финансирование

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 124020500033-8.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Поступила 14 июня 2024 г.; принята к публикации 29 июня 2024 г.

References

1. Morachevsky Yu.V., Tserkovnitskaya I.A. (1980) *Osnovy analiticheskoy khimii redkikh elementov* [Fundamentals of analytical chemistry of rare elements], LSU named after. A.A. Zhdanova, Leningrad (In Russian).
2. Semenov S.A., Reznik A.M., Bukin V.I. (1997) Tekhnologicheskiye aspekty syr'yevoy bazy skandiya [Technological aspects of scandium raw material base], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tsvetnaya metallurgiya*, no. 6, pp. 23–25 (In Russian).

3. Shakhno I.A., Shevtsova Z.N., Fedorov P.I., Korovin S.S. (1976) *Khimiya i tekhnologiya redkikh i rasse-yannykh elementov* [Chemistry and technology of rare and trace elements], Vysshaya shkola, Moscow.
4. Korovin S.S., Zimina G.V., Reznik A.M., Bukin V.I., Korniyushko V.F. (1996) *Redkiye i rasseyannyye elementy. Khimiya i tekhnologiya* [Rare and scattered elements. Chemistry and technology], MISIS, Moscow. (In Russian).
5. Lysenko O.A., Kostikova G.V. (2022) Ekstraktsionnoye rafinirovaniye skandiya neytral'nyimi fosfororganicheskimi soyedineniyami iz khloridno-nitratnykh rastvorov [Extraction refining of scandium with neutral organophosphorus compounds from chloride-nitrate solutions], *Bulletin of St PbSIT (TU)*, no. 61 (87), pp. 27–32. (In Russian).
6. Abdurakhmonov O.E., Semenov S.A., Sokolova Yu.V. (2022) Ekstraktsionnoye izvlecheniye skandiya iz sernokislykh rastvorov vyshchelachivaniya krasnykh shlamov alyuminiyevogo proizvodstva [Extraction extraction of scandium from sulfuric acid leaching solutions of red mud from aluminum production], *Tsvetnyye metally*, no 4, pp. 33–39. (In Russian).
7. Kuzmin V.I., Kuzmina A.A., Kalyakin S.N., Mulagaleeva M.A. (2020), “Extraction of scandium halides with mixtures of tributylphosphate and molecular iodine”, *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*, no. 13(3), pp. 418–429.
8. Dzhevaga N.V., Lobacheva O.L. (2013) Ionnyaya flotatsiya – perspektivnyy sposob pererabotki redkometall'nogo syr'ya [Ion flotation is a promising method for processing rare metal raw materials], *Yestestvennyye i matematicheskiye nauki v sovremennom mire*, no. 8, pp. 134–138. (In Russian).
9. Lutsky, D.S., Dzhevaga, N.V. and Lobacheva, O.L. (2019), “Extraction, Removal and Separation of Rare-Earth Elements in Aqueous Solutions”, *Natural and Technical Sciences*, no. 4 (130), pp. 17–21.
10. Zabolotnykh S.A., Denisova S.A., Nagovitsyn R.R., Vaulina V.N. (2023), “Alkylbenzenesulfonic acid as a reagent for flotation extraction of lanthanum (III), samarium (III) and terbium (III) ions”, *Chem-ChemTech*, vol. 66, no. 3, pp. 45–51.
11. Lesnov A.Ye., Kudryashova O.S., Rizvanova L.G. (2014) Ionnyaya flotatsiya nekotorykh mnogozaryadnykh kationov metallov oksifosom B [Ion flotation of some multicharged metal cations with oxyphos B], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, vol. 57, no. 8, pp. 40–43.
12. Abramzon, A.A., Bocharov, V.V., Gaevoy, G.M. (1979). *Poverkhnostno-aktivnyye veshchestva: Spravochnik* [Surfactants: A Handbook]. Khimiya, Leningrad, Russia. (In Russian).
13. Zabolotnykh, S.A. and Denisova S.A. (2021), “Determination of Alkylbenzenesulfonic acid in aqueous solutions”, *Bulletin of Perm University. Chemistry*. Vol. 11, no. 1, pp. 17–29. (In Russian).
14. Schwarzenbach, G., and Flashka, G. (1970), *Kompleksonometricheskoye titrovaniye* [Complexometric titration], Khimiya, Moscow, Russia. (In Russian).
15. Pestov R.G., Denisova S.A. (2018) *Izucheniye vliyaniya PAV na spektrofotometricheskiye kharakteristiki lantana i skandiya s nekotoryimi organicheskimi reagentami* [Study of the influence of surfactants on the spectrophotometric characteristics of lanthanum and scandium with some organic reagents], In: *Sovremennyye aspekty khimii – materialy V molodezhnoy shkoly-konferentsii*, Perm, pp. 53–54.

Information about the authors

Svetlana A. Zabolotnykh, Candidate of Chemistry Sciences, research assistant, Laboratory of organic complexing reagents, «Institute of Technical Chemistry of the UB RAS» (614013, 3, Koroleva st., Perm, Russia), zabolotsveta@mail.ru.

Svetlana A. Denisova, Candidate of Chemistry Sciences, associate professor, Department of analytical chemistry and expertise, Perm State University (614068, 15, Bukireva st., Perm, Russia), sw.denisova@yandex.ru.

Maryam M. Khuzyagulova, student, Department of analytical chemistry and expertise, Perm State University (614068, 15, Bukireva st., Perm, Russia).

Conflicts of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Submitted 14 June 2024; accepted 29 June 2024