

СОРБЦИЯ СКАНДИЯ АКТИВИРОВАННЫМИ УГЛЯМИ ИЗ СЕРНОКИСЛО-ХЛОРИДНЫХ РАСТВОРОВ

© 2019 г. Вей Мое Аунг, М.В. Марченко, И.Д. Трошкина

Российский химико-технологический университет (РХТУ) им. Д.И. Менделеева, г. Москва

Статья поступила в редакцию 22.04.19 г., доработана 29.06.19 г., подписана в печать 03.07.19 г.

В статических условиях изучена адсорбция скандия активированными углями марок ВСК, ДАС и ПФТ (Россия), полученными из различного сырья (соответственно скорлупа кокосового ореха, антрацит, отходы реактопластов) из сернокисло-хлоридных растворов ($\text{pH} = 2$), моделирующих состав растворов подземного выщелачивания полиметаллических руд. Установлено, что сорбция скандия углями марок ДАС и ВСК протекает с наиболее высокими коэффициентами распределения (133 и $45,8 \text{ см}^3/\text{г}$ соответственно). При этом сорбция скандия углем ДАС характеризуется и большим объемным коэффициентом ($116 \text{ см}^3_{\text{р-ра}}/\text{см}^3_{\text{угля}}$). Изотермы сорбции скандия этими углями имеют линейный характер и описываются уравнением Генри с константами 133 ± 21 и $46 \pm 7 \text{ см}^3/\text{г}$. Методом ограниченного объема раствора получены интегральные кинетические кривые сорбции скандия, линеаризация которых по кинетическим моделям псевдопервого, псевдовторого порядка, модели Еловича и внутридиффузионной модели Вебера–Морриса свидетельствует о том, что кинетика сорбции скандия углем ВСК с более высоким значением коэффициента корреляции ($0,999$) описывается с помощью модели псевдовторого порядка. Обработка кинетических данных по сорбции скандия углем ДАС показала, что при использовании всех моделей коэффициент корреляции низкий ($<0,939$), при этом наибольшее значение наблюдается при применении внутридиффузионной модели. Высказано предположение, что процесс сорбции скандия протекает в смешанно-диффузионной области. В статических условиях изучена возможность элюирования скандия с углей ВСК и ДАС раствором карбоната натрия (10%) — степень десорбции скандия за две ступени элюирования составила $84,0$ и $90,4 \%$ соответственно.

Ключевые слова: скандий, сорбция, активированный уголь, изотерма, сорбционная емкость, константа Генри, кинетические модели, константа скорости, десорбция.

Вей Мое Аунг — аспирант кафедры технологии редких элементов и наноматериалов на их основе РХТУ им. Д.И. Менделеева (125047, г. Москва, Миусская пл., 9). E-mail: june.moehtet.mh@gmail.com.

Марченко М.В. — студент кафедры технологии редких элементов и наноматериалов на их основе РХТУ им. Д.И. Менделеева. E-mail: mara5803@yandex.ru.

Трошкина И.Д. — докт. техн. наук, проф. кафедры технологии редких элементов и наноматериалов на их основе РХТУ им. Д.И. Менделеева. E-mail: tid@rctu.ru.

Для цитирования: Вей Мое Аунг, Марченко М.В., Трошкина И.Д. Сорбция скандия активированными углями из сернокисло-хлоридных растворов. *Изв. вузов. Цвет. металлургия*. 2019. No. 5. С. 49–55.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-5-49-55.

Wai Moe Aung, Marchenko M.V., Troshkina I.D.

Scandium adsorption from sulfuric-chloride solutions with activated carbons

The study covers scandium adsorption in batch conditions by VSK, DAS and PFT activated carbon grades (Russia) of different origin (coconut shell, anthracite, thermoset waste, respectively) from sulfuric acid-chloride solutions ($\text{pH} = 2$) simulating the composition of the underground leaching solutions of polymetallic ores. It was found that scandium adsorption by DAS and VSK carbons proceeds with the highest distribution coefficients (133 and $45.8 \text{ cm}^3/\text{g}$, respectively). Isotherms of scandium adsorption with these carbons are linear and described by the Henry equation with constants 133 ± 21 and $46 \pm 7 \text{ cm}^3/\text{g}$, respectively. A limited solution volume method was used to obtain the integral kinetic curves of scandium adsorption. Their linearization according to the kinetic models of the pseudo-first, pseudo-second order, the Elovich model and the Weber–Morris intra-particle diffusion model indicates that the kinetics of scandium adsorption with VSK carbon having a higher correlation coefficient (0.999) is described using the pseudo-second order model. Description of the kinetic data obtained during the adsorption of scandium with DAS carbon showed that for all the models used the correlation coefficient is low (<0.939), while the highest value is observed when using the intra-particle diffusion model. It was suggested that the scandium adsorption process occurs in the mixed diffusion region. The possibility of scandium elution from VSK and DAS carbons with sodium carbonate solution (10%) was studied in batch conditions, where the degree of scandium desorption in two stages of elution was 84.0 and 90.4% , respectively.

Keywords: scandium, adsorption, activated carbon, isotherm, sorption capacity, Henry constant, kinetic models, rate constant, desorption.

Wai Moe Aung — postgraduate student of the Department of technology of rare elements and nanomaterials of Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (125047, Russia, Moscow, Miusskaya sq., 9). E-mail: june.moehtet.mh@gmail.com.

Marchenko M.V. — student of the Department of technology of rare elements and nanomaterials of Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia. E-mail: mara5803@yandex.ru.

Troshkina I.D. — Dr. Sci. (Tech.), prof. of the Department of technology of rare elements and nanomaterials of Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia. E-mail: tid@rctu.ru.

Citation: Wai Moe Aung, Marchenko M.V., Troshkina I.D. Scandium adsorption from sulfuric-chloride solutions with activated carbons. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2019. No. 5. P. 49–55 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2019-5-49-55.

Скандий — один из самых рассеянных элементов Периодической системы Менделеева, наиболее емкими областями потребления которого являются производство сплавов на основе алюминия, в том числе для самолетостроения и спортивного инвентаря, твердооксидных топливных элементов и мощных металлогалогенных ламп, лазерная техника, специальная керамика [1]. Промышленное использование скандия ограничивается его высокой ценой, обусловленной низким содержанием в сырье и сложной технологией получения. Дляпутного извлечения скандия из растворов, образующихся при гидрометаллургической переработке различных видов сырья — бокситов, урановых руд, ильменитов, вольфрамитов, касситеритов, циркона, с содержанием 1–200 г/т, применяются, как правило, адсорбционные и экстракционные методы [2–19]. При использовании экстрагентов и материалов, их содержащих, — импрегнатов или ТВЭКСов [6, 14, 15] — наблюдаются потери экстрагентов за счет растворимости, что увеличивает стоимость извлечения скандия из его разбавленных растворов.

Применение в адсорбционных процессах извлечения скандия, присутствующего в растворах в виде катиона или в составе анионных комплексов [2], как традиционных анионитов, так и селективных комплексообразующих, в основном дорогостоящих фосфорсодержащих ионитов [3, 4], отличает длительное время установления равновесия: от 4–6 ч. При использовании волокнистых материалов для извлечения металлов можно повысить скорость процессов [16], однако их объемная емкость значительно ниже, что может привести к значительному увеличению объема применяемых адсорбционных аппаратов. Альтернативными адсорбционными материалами, имеющими зачастую лучшие, по сравнению с гранулированными синтетическими органическими смолами, кинетические характеристики, могут быть активированные угли [17, 18].

Цель работы — исследование сорбционных характеристик по скандию российских активированных углей последнего поколения при его извлечении из серноокисло-хлоридных растворов.

Методика экспериментов

Активированные угли, используемые в работе, изготовлены в ОАО «ЭНПО «Неорганика» (г. Электросталь, Моск. обл.) из различного сырья: кокосового ореха, каменного угля — антрацита, отходов реактопластов. Их характеристики представлены в табл. 1 [18].

Уголь ДАС отличается высокая насыпная плотность. В сравнении с изучаемыми углями развитый объем микропор, ответственных за емкостные характеристики [18], характерен для угля ВСК, полученного из скорлупы кокосового ореха (см. табл. 1).

Эксперименты по сорбции скандия в активированных углях проводили в статических условиях при комнатной температуре из серноокисло-хлоридных растворов ($[\text{SO}_4^{2-}]$, 10 г/дм³; $[\text{Cl}^-]$, 1 г/дм³) с концентрацией скандия 0,44 ммоль/дм³ (20 мг/дм³) и кислотностью, соответствующей pH = 2. Состав растворов моделировал состав продуктивных растворов подземного выщелачивания полиметалльного сырья [20]. Соотношение фаз уголь : раствор при сорбции составляло 1 : 500 (г : см³). После контакта фаз при периодическом перемешивании (120 мин⁻¹) на лабораторном встряхивателе ЛАБ-ПУ-02 в течение 3 сут и их разделения декантированием определяли концентрацию скандия в водной фазе с помощью фотометрического метода [2]. По разнице концентраций скандия в исходном и конечном растворах с учетом соотношения фаз рассчитывали содержание (сорбционную емкость, SE) скандия в угле. Коэффициент распределения скандия (K_d) в угле вычисляли как отношение равновесной сорбционной емкости угля по скандию

Таблица 1

Характеристики активированных углей различного происхождения

Показатели	Марка активированного угля		
	ВСК	ПФТ	ДАС
Исходное сырье	Скорлупа кокосового ореха	Отходы реактопластов	Антрацит
Насыпная плотность, г/дм ³	387	290	872
Прочность, % (ГОСТ 16188-70)	87,6	84,5	83,3
Содержание золы, %	3,3	12,1	7,1
Объем пор, см ³ /г:			
суммарный	0,98	1,28	0,23
макропоры	0,05	0,35	0,03
мезопоры	0,10	0,26	0,07
микропоры	0,83	0,67	0,13
Размер микропор, нм	1,51	1,70	1,55
Адсорбционная способность, мг/г:			
по йоду	1150	1100	600
по метиленовому голубому	327	245	58

(ммоль/г или ммоль/см³) к его равновесной концентрации в растворе (ммоль/дм³).

Кинетику сорбции скандия углями изучали методом ограниченного объема раствора на установке с термостатируемыми ячейками при комнатной температуре (погрешность измерения температуры $\pm 0,1$ град). Отношение навески угля (г) к объему раствора (см³) составляло 1 : 500.

Десорбцию скандия из насыщенных активированных углей осуществляли при комнатной температуре в статических условиях при периодическом перемешивании на встряхивателе. Соотношение фаз уголь : раствор составляло 1 : 200 (г : мл). Отделенный от угля элюат анализировали на скандий и по балансовому соотношению с учетом емкости насыщенного сорбента определяли остаточную емкость и степень десорбции.

Результаты и их обсуждение

Данные по сорбции скандия из модельных растворов углями (табл. 2) позволяют выбрать активированные угли марок ДАС и ВСК как обладающие наиболее высокими массовым (133 и 45,8 см³/г) и объемным (116 и 17,8 см³_{р-ра}/см³_{угля}) коэффициентами распределения скандия.

С использованием этих углей получены изотермы сорбции. Изотерма описывает равновесие в системе «сорбируемый элемент — сорбент» и является одной из основных характеристик сорбцион-

ного материала, позволяющей рассчитать емкость сорбента при извлечении элемента из различных по концентрации растворов, а также количество ступеней сорбции, необходимых для расчета оборудования.

Полученные изотермы сорбции скандия углями ВСК и ДАС из сернокисло-хлоридных растворов указанного выше состава (рис. 1) имеют линейный характер и могут быть описаны уравнением Генри [21, 22].

Рассчитанные по изотермам сорбции скандия углями ДАС и ВСК константы Генри составили 133 ± 21 и 46 ± 7 см³/г соответственно. Эти значения свидетельствуют о достаточно высокой сорбционной способности по скандию исследуемых углей. Такую емкость по скандию для угля ВСК можно объяснить тем, что он обладает наиболь-

Таблица 2

Сорбция скандия активированными углями ВСК, ПФТ и ДАС из сернокисло-хлоридных растворов*

Марка угля	CE·10 ² , ммоль/г	K _d	
		Массовый, см ³ /г	Объемный, см ³ _{р-ра} /см ³ _{угля}
ВСК	1,62	45,8	17,8
ПФТ	1,43	40,5	13,3
ДАС	4,70	133	116

* [Sc³⁺] – 20 мг/дм³, [SO₄]²⁻ – 10 г/дм³, [Cl]⁻ – 1 г/дм³, рН = 2, Т : Ж = 1 : 500 (г : см³)

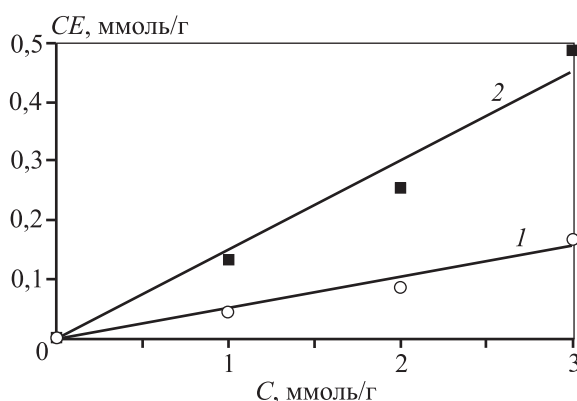


Рис. 1. Изотермы сорбции скандия активированными углями ВСК (1) и ДАС (2) из сернокисло-хлоридных растворов

шим объемом микропор — 0,83 см³/г (см. табл. 1) среди рассматриваемых углей. Что касается активированного угля ДАС, то повышенное сродство органофильного скандия к нему, видимо, связано с наличием на поверхности и в объеме этого угля соединений, способных к физической адсорбции и ионному обмену с сорбируемым катионом скандия (Sc^{3+} или $[Sc(H_2O)_6]^{3+}$) или скандийсодержащей соли (сульфата, хлорида).

Как показали результаты кинетических исследований сорбции скандия из модельных сернокисло-хлоридных растворов активированными углями (рис. 2), интегральные кинетические кривые сорбции скандия на углях имеют характерную выпуклую форму.

Данные этих кривых были обработаны в соответствии с кинетическими уравнениями моделей псевдопервого и псевдвторого порядка, а также модели Еловича и внутридиффузионной модели Вебера—Морриса [21, 22] (рис. 3), которые в линейной форме имеют вид

$$\log(Q_e - Q_\tau) = \log Q_e - \frac{k_1}{2,303} \tau,$$

$$\frac{\tau}{Q_\tau} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{1}{Q_e} \tau,$$

$$Q_\tau = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \tau,$$

$$Q_\tau = k_p \tau^{1/2} + B,$$

где Q_e , Q_τ — величины адсорбции равновесная и в момент времени τ , ммоль/г; k_1 и k_2 — константы скорости (псевдопервый и псевдвторой по-

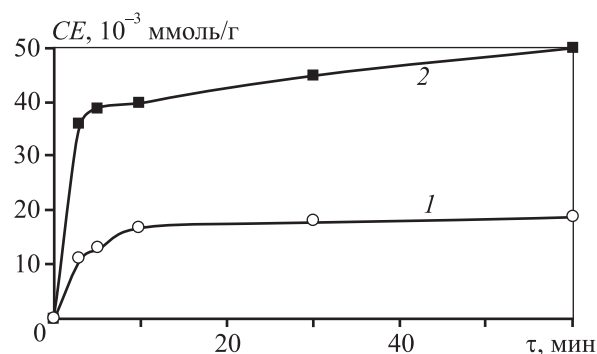


Рис. 2. Интегральные кинетические кривые сорбции скандия углями ВСК (1) и ДАС (2)

рядок), мин⁻¹ и г/(ммоль·мин)⁻¹ соответственно; k_p — константа скорости внутренней диффузии, мг/(г·мин^{1/2}); B — константа, мг/г; α — начальная скорость адсорбционного процесса, г/(ммоль·мин); β — константа Еловича, г·моль⁻¹.

Кинетические константы, полученные обработкой данных по моделям псевдопервого и псевдвторого порядка, модели Еловича и внутридиффузионной модели Вебера—Морриса [20] (табл. 3) свидетельствуют о том, что кинетика адсорбции скандия активированным углем ВСК с более высоким значением коэффициента корреляции описывается с использованием модели псевдвторого порядка.

Данные же по кинетике сорбции углем ДАС адекватно описываются уравнением внутридиффузионной модели, которая, в отличие от модели псевдвторого порядка, позволяет провести идентификацию механизма сорбции. Константа B в уравнении пропорциональна толщине пограничного слоя (пленке). Если она не равна нулю, т.е. прямая не проходит через начало координат, что имеет место при обработке кинетических данных по сорбции не только углем ДАС, но и ВСК, то процесс сорбции протекает во внешнедиффузионной либо смешанно-диффузионной областях.

Исходя из полученных данных, с учетом значительного содержания микропор в выбранных активированных углях, можно предположить, что в лимитирующую стадию сорбции скандия значительный вклад вносит внутренняя диффузия и процесс контролирует смешанная диффузия.

Для оценки возможности элюирования скандия использовали раствор карбоната натрия с концентрацией 10 %. Элюирование проводили в две ступени. Рассчитанные значения остаточной

Таблица 3

Константы скорости сорбции скандия углями ДАС и ВСК

Модель							
псевдопервого порядка		псевдовторого порядка		Еловича		внутренней диффузии Вебера–Морриса	
$k_1, \text{мин}^{-1}$	R^2	$k_2, \text{г} \cdot (\text{ммоль} \cdot \text{мин})^{-1}$	R^2	$\beta, \text{г} \cdot \text{ммоль}^{-1}$	R^2	$k_p, \text{мг/г}$	R^2
ДАС							
0,003	0,793	0,511	0,793	120	0,753	0,37	0,939
ВСК							
0,027	0,429	1,204	0,999	33,67	0,885	0,15	0,979

Таблица 4

Десорбция скандия с углей ВСК и ДАС раствором карбоната натрия (10 %)

Марка угля	$CE_{исх} \cdot 10^2, \text{ммоль/г}$	$CE_1 \cdot 10^2, \text{ммоль/г}$	$CE_2 \cdot 10^2, \text{ммоль/г}$	Степень десорбции, %
ВСК	1,62	0,66	0,26	84,0
ДАС	4,70	1,52	0,45	90,4

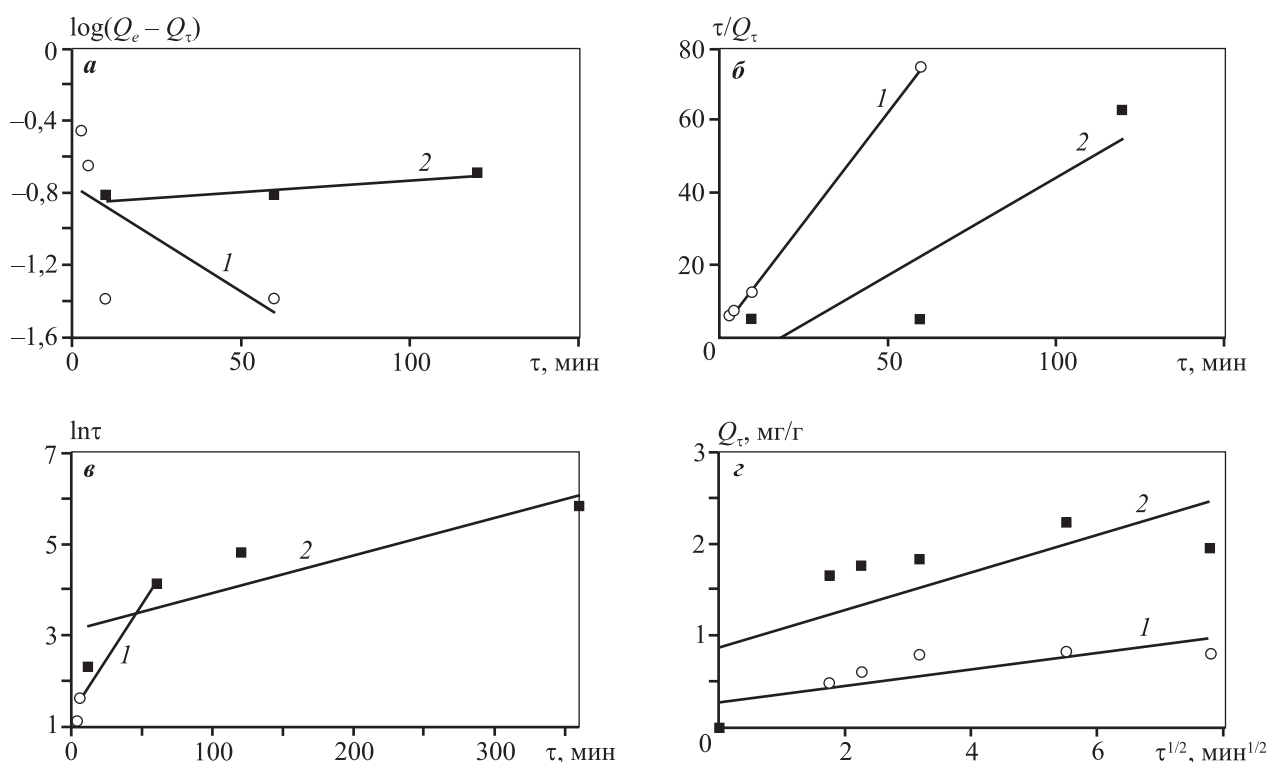


Рис. 3. Линеаризация кинетических данных по адсорбции скандия на углях ВСК (1) и ДАС (2) по модели псевдопервого (а) и псевдовторого (б) порядка, по модели Еловича (в) и модели внутренней диффузии Вебера–Морриса (г)

емкости после первой (CE_1) и второй (CE_2) ступеней, а также степени десорбции представлены в табл. 4.

Данные по десорбции скандия из углей ВСК и ДАС свидетельствуют о хорошей эффективности

выбранного элюента — степень десорбции за два контакта в статических условиях составляет 84,0 и 90,4 % соответственно, что позволяет прогнозировать полноту десорбции в динамических условиях осуществления процесса.

Заключение

Полученные равновесные и кинетические характеристики сорбции скандия из модельных серноокисло-хлоридных растворов выбранными в работе активированными углями марок ДАС и ВСК, а также оценка его элюирования раствором карбоната натрия свидетельствуют о том, что уголь ДАС может быть использован в гидрометаллургических процессах попутного извлечения скандия при комплексной переработке различных видов скандийсодержащего полиметалльного сырья.

Сорбция скандия на угле ДАС, сырьем для которого является антрацит, характеризуется высоким объемным ($116 \text{ см}^3_{\text{р-ра}}/\text{см}^3_{\text{угля}}$) коэффициентом распределения. Изотерма сорбции в области изучаемых концентраций скандия имеет линейный характер и описывается уравнением Генри с константой $133 \pm 21 \text{ см}^3/\text{г}$. Процесс сорбции углем ДАС протекает в смешанно-диффузионной области. При этом кинетические данные по сорбции скандия описываются с использованием внутридиффузионной модели Вебера—Морриса.

Авторы выражают благодарность докт. техн. наук, проф. В.М. Мухину за предоставленные образцы активированных углей и консультации.

Литература/References

- Обзор рынка скандия в России и мире. М.: ИГ «Информайн», 2017.
The review of the market of scandium in Russia and the world. Moscow: IG «Infomain», 2017 (In Russ.).
- Комиссарова Л.Н. Неорганическая и аналитическая химия скандия. М.: Эдиториал УРСС, 2001.
Komissarova L.N. Inorganic and analytical chemistry of scandium. Moscow: Editorial URSS, 2001 (In Russ.).
- Смирнов А.Л., Титова С.М., Рычков В.Н., Кириллов Е.В., Попонин Н.А., Свирский И.А. Сорбционное извлечение скандия фосфорсодержащими ионитами. *Сорбц. и хроматограф. процессы*. 2016. Т. 16. No. 4. С. 439—445.
Smirnov A.L., Titova S.M., Rychkov V.N., Kirillov E.V., Poponin N.A., Svirskii I.A. Sorption of scandium by phosphate-based ion exchangers. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2016. Vol. 16. No. 4. P. 439—445 (In Russ.).
- Соколова Ю.В., Пироженко К.Ю. Сорбция скандия из серноокислых растворов с использованием фосфорсодержащих ионитов промышленных марок. *Сорбц. и хроматограф. процессы*. 2015. No. 4. С. 563—570.
Sokolova Yu.V., Pirozhenko K.Yu. Sorption of scandium from sulfuric acid solutions using a phosphorus-containing ion exchangers industrial brands. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2015. No. 4. P. 563—570 (In Russ.).
- Яценко С.П., Пасечник Л.А. Скандий: наука и технология. Екатеринбург: Изд-во Урал. федерал. ун-та, 2016.
Yatsenko S.P., Pasechnik L.A. Scandium: science and technology. Ekaterinburg: Izd-vo UrFU, 2016.
- Korovin V., Pogorelov Yu. Comparison of scandium recovery mechanisms by phosphorus-containing sorbents, solvent extractants and extractants supported on porous carrier. In: *Scandium: compounds, productions and applications*. N.Y.: Nova Science Publishers Inc., 2011. P. 77—100.
- Weiwei Wang, Yoko Pranolo, Chu Yong Cheng. Recovery of scandium from synthetic red mud leach solutions by solvent extraction with D2EHPA. *Sep. Purif. Technol.* 2013. Vol. 108. P. 96—102. DOI: 10.1016/j.seppur.2013.02.001.
- Wang, W., Yong C.C. Separation and purification of scandium by solvent extraction and related technologies. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2011. Vol. 86. No. 10. P. 1237—1246.
- Korovin V., Shestak Y., Pogorelov Yu., Cortina J.L. Solvent extraction and liquid membranes: fundamentals and applications in new materials. *CRC Press, Taylor and Francis Group*, 2008. P. 278—299.
- Wang W., Pranolo Y., Yong C.C. Metallurgical processes for scandium recovery from various resources: A review. *Hydrometallurgy*. 2011. Vol. 108. No. 1—2. P. 100—108.
- Fujinaga K., Yoshimori M., Nakajima Y., Oshima S., Watanabe Y., Stevens G.W., Komatsu Y. Separation of Sc(III) from ZrO(II) by solvent extraction using oxidized Phoslex DT-8. *Hydrometallurgy*. 2013. Vol. 133. P. 33—36.
- Wang W., Pranolo Y., Cheng C.Y. Recovery of scandium from synthetic red mud leach solutions by solvent extraction with D2EHPA. *Sep. Purif. Technol.* 2013. Vol. 108. P. 96—101.
- Rychkov V.N., Semenishchev V.S., Mashkovtsev M.A., Kirillov E.V., Kirillov S.V., Bunkov G.M., Botalov M.S. Deactivation of the scandium concentrate recovered from uranium leach liquors. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2016. Vol. 310. No. 3. P. 1247—1253. DOI: 10.1007/s10967-016-4990-3.
- Пьяе Пьо Аунг, Трошкина И.Д., Веселова О.А., Давидович Ю.А., Цюрупа М.П., Даванков В.А. Сорбция скандия сверхсшитыми полистирольными импрегнатами, содержащими фосфорорганические кислоты. *Сорбц. и хроматограф. процессы*. 2017. Т. 17. No. 1. С. 45—53.
Pyae Phy Aung, Troshkina I.D., Veselova O.A., Davidovich Yu.A., Tsyurupa M.P., Davankov V.A. Sorption of scan-

- dium supersewn polystyrene impregnate containing organophosphorus acids. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2017. Vol. 17. No. 1. P. 45—53 (In Russ.).
15. Трошкина И.Д., Обручникова Я.А., Пестов С.М. Сорбция металлов материалами с подвижной фазой экстрагентов. *Рос. хим. журн.* 2017. Т. LXI. No. 4. С. 54—65.
Troshkina I.D., Obruchnikova Ya.A., Pestov S.M. Sorption of metals with materials of mobile extractants. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal*. 2017. Vol. LXI. No. 4. P. 54—65 (In Russ.).
 16. Kosandrovich E.G., Soldatov V.S. Fibrous ion exchangers. In: *Ion Exchange technology I: Theory and materials*. Chapter 9. Eds. Inamuddin, M. Luqman. Springer Science + Business Media B.V., 2012. P. 299—371.
 17. Burakova I.V., Burakov A.E., Tkachev A.G., Troshkina I.D., Veselova O.A., Babkin A.V., Wei Moe Aung, Imran Ali. Kinetics of the adsorption of scandium and cerium ions from sulfuric acid solutions on a nanomodified activated carbon. *J. Mol. Liq.* 2018. Vol. 253. P. 277—283. DOI: [org/10.1016/j.molliq.2018.01.063](https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.01.063).
 18. Мухин В.М., Зубова И.Д., Гурьянов В.В., Курилкин А.А., Гостев В.С. Новые технологии получения активных углей из реактопластов. *Сорбц. и хроматограф. процессы*. 2009. Т. 9. Вып. 2. С. 191—195.
Mukhin V.M., Zubova I.D., Gur'yanov V.V., Kurilkin A.A., Gostev V.S. New techniques for obtaining active carbons from thermosetting plastics. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2009. Vol. 9. No. 2. P. 191—195 (In Russ.).
 19. Lash L.D., Ross J.R. Vitro chemical recovers costly scandium from uranium solutions. *Mining Eng.* 1961. Vol. 13. No. 8. P. 966—969.
 20. Smirnov A.L., Titova S.M., Rychkov V.N., Bunkov G.M., Semenishchev V.S., Kirillov E.V., Poponin N.N., Svirsky I.A. Study of scandium and thorium sorption from uranium leach liquors. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 2017. Vol. 312. P. 277—283. DOI [10.1007/s10967-017-5234-x](https://doi.org/10.1007/s10967-017-5234-x).
 21. Ho Y.S. Review of second-order models for adsorption systems. *J. Hazard. Mater.* 2006. Vol. B136. P. 681—689. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.12.043>.
 22. Tran H.N., You S.-J., Hosseini-Bandegharai A., Chao H.-P. Mistakes and inconsistencies regarding adsorption of contaminants from aqueous solutions: A critical review. *Water Res.* 2017. Vol. 120. P. 88—116. DOI: [10.1016/j.watres.2017.04.014](https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.04.014).