

Научная статья  
УДК 669.793  
doi: 10.17223/24135542/39/3

## **Сорбционная переработка скандийсодержащего раствора уранового производства слабоосновным анионитом с первичными аминогруппами**

**Алексей Викторович Татарников<sup>1</sup>, Софья Иннокентьевна Андреева<sup>2</sup>,  
Алексей Александрович Соловьев<sup>3</sup>, Евгений Юрьевич Мешков<sup>4</sup>,  
Ирина Дмитриевна Трошкina<sup>5</sup>, Антон Сергеевич Лавров<sup>6</sup>**

*<sup>1, 2, 3, 4</sup>АО «ВНИПИпромтехнологии», Москва, Россия*

*<sup>5</sup>Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева,  
Москва, Россия*

*<sup>6</sup>АО «Далур», Уксянское, Россия*

*<sup>1</sup>Tatarnikov.A.V@vnipipt.ru*

*<sup>2</sup>Andreeva.S.I@vnipipt.ru*

*<sup>3</sup>Solovev.A.A@vnipipt.ru*

*<sup>4</sup>Meshkov.E.J@vnipipt.ru*

*<sup>5</sup>troshkina.i.d@muctr.ru*

*<sup>6</sup>AnSeLavrov@rosatom.ru*

**Статья подготовлена в рамках VII Международного симпозиума по материалам и технологиям здравоохранения, энерго- и биобезопасности, рациональному природопользованию. Южно-Сахалинск, Россия, 25–28 августа 2025 г.**

**Аннотация.** Растворы скважинного подземного выщелачивания урана в настоящее время рассматриваются как перспективный источник извлечения не только урана, но и редких, а также редкоземельных элементов, имеющих высокую ценность в различных отраслях промышленности – от авиакосмической до электронной. Однако низкие концентрации целевых компонентов в таких растворах в сочетании с наличием значительного количества сопутствующих и конкурирующих примесей создают серьезные технологические трудности при их селективном извлечении и последующем получении соединений требуемой степени чистоты.

В представленной работе обоснована возможность эффективного выделения скандия из фтористоводородных растворов, образующихся на участке попутной добычи скандия АО «Далур», с применением технологии вторичной сорбции на слабоосновном анионите, содержащем в своей структуре первичные аминогруппы. Установлено, что при концентрации фторид-ионов порядка 2 М полная динамическая обменная емкость анионита по скандию достигает 49,7 г/дм<sup>3</sup>, что свидетельствует о высокой селективности материала по отношению к целевому элементу.

В работе описан комплекс научно-исследовательских работ, направленных на получение кондиционных соединений скандия – оксида и трифторида скандия – из карбонатсодержащего элюата, образующегося после десорбции металла из фазы насыщенного анионита. Рассмотрено два подхода: прямое кислотное осаждение для получения трифторида скандия, а также щелочное осаждение с образованием

оксигидроксида скандия, пригодного для дальнейшего оксалатного переосаждения с целью получения кондиционного оксида скандия.

Использование разработанной технологии позволяет исключить часть промежуточных осадительных операций и этапов конверсии, характерных для традиционных схем, что снижает суммарные потери целевого металла и повышает эффективность переработки. По расчетным данным, сквозная степень извлечения скандия в готовый продукт достигает не менее 95%, что более чем на 30% превосходит показатели, реализуемые в действующей на предприятии технологии. Кроме того, предложенный метод технологически совместим с существующими производственными линиями, что упрощает его промышленное внедрение и минимизирует капитальные затраты на модернизацию оборудования.

**Ключевые слова:** скандий, слабоосновный анионит, сорбция, селективность, концентрирование

**Для цитирования:** Татарников А.В., Андреева С.И., Соловьев А.А., Мешков Е.Ю., Трошкина И.Д., Лавров А.С. Сорбционная переработка скандийсодержащего раствора уранового производства слабоосновным анионитом с первичными аминогруппами // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2025. № 39. С. 42–56. doi: 10.17223/24135542/39/3

Original article

doi: 10.17223/24135542/39/3

## **Sorption processing of scandium-containing uranium production solution with a weak base anionite with primary amino groups**

**Alexey V. Tatarnikov<sup>1</sup>, Sofia I. Andreeva<sup>2</sup>, Alexey A. Soloviev<sup>3</sup>,  
Evgeny Yu. Meshkov<sup>4</sup>, Irina D. Troshkina<sup>5</sup>, Anton S. Lavrov<sup>6</sup>**

<sup>1, 2, 3, 4</sup> JSC “Design-Prospecting and Scientific Research Institute of Industrial Technologies”,  
Moscow, Russian Federation

<sup>5</sup> D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation  
<sup>6</sup> JSC “Dalur”, Uksyanskoe, Russian Federation

<sup>1</sup> Tatarnikov.A.V@vnipipt.ru

<sup>2</sup> Andreeva.S.I@vnipipt.ru

<sup>3</sup> Soloviev.A.A@vnipipt.ru

<sup>4</sup> Meshkov.E.J@vnipipt.ru

<sup>5</sup> troshkina.i.d@muctr.ru

<sup>6</sup> AnSeLavrov@rosatom.ru

**Abstract.** Solutions for underground uranium leaching are currently considered a promising source for recovering not only uranium, but also rare and rare earth elements that are highly valuable in various industries, from aerospace to electronics. However, the low concentrations of target components in such solutions, combined with the presence of a significant amount of associated and competing impurities, create serious technological difficulties in their selective extraction and subsequent production of compounds of the required degree of purity.

This paper substantiates the possibility of effective recovery of scandium from hydrofluoric acid solutions formed at the Dalur JSC scandium by-product extraction

site using secondary sorption technology on a weakly basic anion exchanger containing primary amino groups in its structure. It has been established that at a fluoride ion concentration of about 2 M, the total dynamic exchange capacity of the anionite for scandium reaches 49.7 g/dm<sup>3</sup>, which indicates the high selectivity of the material with respect to the target element.

The paper describes a complex of research works aimed at obtaining commercial-grade scandium compounds – scandium oxide and scandium trifluoride – from a carbonate-containing eluate formed after desorption of the metal from the saturated anionite phase. Two approaches are considered: direct acid precipitation to obtain scandium trifluoride, and alkaline precipitation with the formation of scandium oxihydroxide, suitable for further oxalate precipitation to obtain commercial-grade scandium oxide.

The use of the developed technology makes it possible to eliminate some of the intermediate precipitation operations and conversion stages characteristic of traditional schemes, which reduces the total losses of the target metal and increases the efficiency of processing. According to calculations, the overall recovery rate of scandium in the finished product reaches at least 95%, which is more than 30% higher than the rates achieved by the technology currently in use at the enterprise. In addition, the proposed method is technologically compatible with existing production lines, which simplifies its industrial implementation and minimises capital costs for equipment modernisation.

**Keywords:** scandium, weak base anion exchanger, sorption, selectivity, concentration

**For citation:** Tatarnikov, A.V., Andreeva, S.I., Soloviev, A.A., Meshkov, E.Yu., Troshkina I.D., Lavrov A.S. Sorption processing of scandium-containing uranium production solution with a weak base anionite with primary amino groups. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Chimia – Tomsk State University Journal of Chemistry*, 2025, 39, 42–56. doi: 10.17223/24135542/39/3

## **Введение**

Использование скандия в качестве легирующей добавки алюминиевых, никелевых и других сплавов для повышения механических свойств лигатуры и сплавов нашло широкое применение в авиационной и ракетной промышленности, судостроении и реакторостроении [1, 2].

Мировое производство скандия реализуется его попутным извлечением при добыче и производстве таких металлов, как алюминий, титан, уран, поскольку скандий не имеет собственных минеральных источников, пригодных для промышленной разработки [3–5]. Наиболее перспективными источниками скандия могут быть красные шламы глиноземного производства, кеки вольфрамового производства, отработанные расплавы титановых хлораторов, маточные растворы отработки урановых месторождений и др. [6–8].

Помимо присутствия редкоземельных металлов в возвратных растворах (ВР), образующихся после процесса сорбционного извлечения урана из продуктивных растворов скважинного подземного выщелачивания (СПВ), фиксируется наличие скандия в небольших количествах – от долей миллиграмма до миллиграмм на литр. Несмотря на столь низкие концентрации, этот элемент представляет значительную ценность как сырье для различных высокотехнологичных отраслей. Поэтому возможность извлечения скандия из данного типа вторичных источников на протяжении длительного времени вызывает устойчивый интерес исследователей [6–11].

Ранее в ряде работ предпринимались попытки сорбционного извлечения скандия из ВР с применением различных типов ионообменных материалов, в частности фосфорсодержащих ионитов [12–16].

В настоящее же время на предприятии АО «Далур» на Далматовском урановом месторождении для селективного извлечения скандия из ВР подземного выщелачивания применяется сорбционная технология, основанная на использовании твердого экстрагента (ТВЭКС). Данный сорбционный материал представляет собой пористый сополимер стирола и дивинилбензола, в структуру которого внедрен жидкий экстрагент – ди-(2-этилгексил)fosфорная кислота (Д2ЭГФК), модифицированная три-н-октилфосфиноксидом и трибутилфосфатом. В качестве разбавляющей среды в составе экстрагента используется изододекан, обеспечивающий оптимальные условия для удержания и селективного извлечения целевого металла [17, 18].

После насыщения твердого экстрагента скандием его десорбция проводится обработкой фтористоводородной кислотой. Последующие этапы выделения скандия из полученных фтористоводородных элюатов реализуются посредством многоступенчатых осадительных операций, конверсии и экстракции. Однако многостадийность процесса и сопутствующие потери на каждом этапе приводят к заметному снижению степени извлечения металла, что является одним из основных технологических ограничений реализуемого метода и требует дальнейшей оптимизации.

В рамках представленной работы был проведен комплексный цикл лабораторных исследований, посвященных извлечению скандия из фтористоводородного элюата, образующегося после десорбции ТВЭКС на участке по-путной добычи скандия на урановом производстве АО «Далур». Основная цель проведенных экспериментов заключалась в разработке технологического подхода, позволяющего получать кондиционные формы соединений скандия – оксид или трифторид – с минимизацией числа стадий осаждения.

### **Методы измерений**

Для анализа на содержание сорбированных металлов иониты растворяли известным в аналитической химии методом «мокрого сжигания» – совместным действием концентрированной серной кислоты и окислителя при повышенной температуре.

Металлы в полученном растворе, как и в исходных растворах, анализировали методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на приборе Varian Vista-Pro.

Определенное массовое содержание элемента в анионитах пересчитывали в единицах объемной емкости набухшего в рабочей среде анионита, для чего использовали ранее определенный коэффициент набухания ионита ( $K_{уд}$ ), рассчитанный по формуле

$$K_{уд} = V_{наб} / m_{сух}$$

где  $V_{наб}$  – объем набухшего в рабочей среде анионита,  $m_{сух}$  – масса набухшего в рабочей среде анионита в сухом состоянии.

## **Результаты экспериментальной части**

### ***Сорбционное извлечение скандия из фтористоводородного раствора***

Работу по сорбционному извлечению скандия из фтористоводородных растворов проводили в динамических условиях и использовали слабоосновные аниониты с первичными (Sunresin CT20, Purolite A110), вторичными (Purolite A170), третичными аминогруппами (Purolite A100) и полиаминные слабоосновные аниониты (Россион 25, Purolite S984), содержащие в своем составе смесь вышеперечисленных аминогрупп.

Через ионообменные колонки с анионитами пропускали реальные фторидные растворы скандия, в качестве которых использовали производственные десорбаты от десорбции на АО «Далур» насыщенного скандием ТВЭКС. Содержание скандия в растворе в различных опытах составляло 480–520 мг/дм<sup>3</sup> при концентрации фторид-иона 2–4,5 М. Скорость подачи раствора во всех опытах была постоянной и составляла 1,6 объемов раствора на 1 колоночный объем анионита в час (1,6 к.о./ч). Растворы пропускали в нижнюю часть сорбционной колонки до выравнивания содержания скандия в исходном растворе и растворе после сорбции. После этого аниониты промывали водой, выгружали из колонок и анализировали на содержание скандия, определяя полную динамическую емкость анионита по скандию (ПДОЕ). Динамическую емкость анионита до проскака (ДОЕДП) скандия в маточник сорбции на уровне 1–3 мг/дм<sup>3</sup> определяли по расчету из баланса сорбции по растворам. Результаты проведенного опыта отражены в табл. 1.

Таблица 1

#### **Зависимость емкости анионитов по скандию от основности сорбента при сорбции скандия из фторидных растворов**

Анионит	Ионообменная группа	Содержание F <sup>−</sup> в растворе, М	ДОЕДП по скандию, г/дм <sup>3</sup>	ПДОЕ по скандию, г/дм <sup>3</sup>
Purolite A100	Третичные аминогруппы	2,0	0,54	0,83
Purolite A170	Вторичный аминогруппы	3,5	1,57	3,25
Россион 25	Полиаминный – первичные, вторичные и третичные аминогруппы	3,5	8,08	22,25
Purolite S984	Полиаминный – первичные, вторичные и третичные аминогруппы	3,5	10,09	25,00
Sunresin CT20	Первичные аминогруппы	2,0	31,30	49,70
Purolite A110	Первичные аминогруппы	3,5	20,90	41,00
Sunresin CT20	Первичные аминогруппы	4,5	12,80	35,10

Результаты исследований показали, что аниониты, в составе которых присутствуют исключительно первичные аминогруппы, обладают значительно более высокими емкостными показателями по отношению к скандию. При этом значения ПДОЕ и ДОЕДП для остальных типов слабоосновных анионитов оказываются почти на порядок ниже.

Полиаминные аниониты также имеют сравнительно высокую ПДОЕ и ДОЕДП по скандию, поскольку содержат значительное количество первичных аминогрупп.

Для проведения последующих лабораторных исследований по извлечению скандия из фазы насыщенного ионита использовался анионит Sunresin CT20, поскольку он является более доступным аналогом Великобританского анионита Purolite A110 и при этом имеет примерно такую же полную обменную емкость.

### *Промывка насыщенного анионита*

При проведении лабораторных исследований использовали анионит, который был предварительно насыщен в динамических условиях, аналогичных ранее описанному опыту по насыщению слабоосновных анионитов. В три однотипные сорбционные колонки загружали насыщенный скандием анионит, который содержал (г/дм<sup>3</sup>): 35,1 Sc; 0,749 U; 2,687 Fe; 5,859 Ti; 6,872 Mo; 1,718 Al; или 17,885 по сумме примесных элементов.

Через заполненные сорбционные колонки пропускали растворы серной кислоты концентрацией 1, 2, 6 и 8 н. со скоростью 1 объем раствора на объем анионита в час (1 к.о./ч) при подаче раствора в нижнюю часть сорбционной колонки. Всего пропускали 6 объемов раствора на один объем анионита, после чего аниониты из колонок выгружали и определяли в них содержание скандия и примесей. Рассчитывали потери скандия с промывными растворами и остаточное содержание примесей в анионитах в процентах от исходного содержания в насыщенном анионите, результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

#### **Влияние концентрации серной кислоты в промывном растворе на эффективность отмычки насыщенного анионита от примесей и величину потерь скандия**

Концентрация серной кислоты в промывном растворе, н.	Потери Sc с промывным раствором, %	Остаточное содержание примесей в анионите, % от исходного
1	Осадок гидратов в слое анионита	
2	1,91	8,33
6	2,37	8,12
8	1,89	11,4

Анализ полученных результатов показывает, что степень очистки анионита от примесных компонентов и уровень потерь скандия практически не зависят от концентрации серной кислоты в промывочном растворе. Минимально

допустимое значение концентрации серной кислоты определяется растворимостью примесей и ограничивается риском образования их гидратных форм в объеме анионита. Верхний предел концентрации обусловлен необходимостью рационального расходования кислоты и предотвращения ее избыточного использования.

Аналогичным способом исследовалась возможность промывки насыщенного анионита азотнокислым раствором. Повышение концентрации азотной кислоты в промывном растворе выше 4 н. не дает заметного улучшения степени удаления примесных элементов. Согласно данным, представленным на рис. 3, для достижения удовлетворительной очистки анионита от примесей достаточно подать от 3 до 6 удельных объемов промывочного раствора. Дальнейшее увеличение расхода промывочного реагента приводит лишь к лишнему потреблению кислоты без ощутимого положительного эффекта.

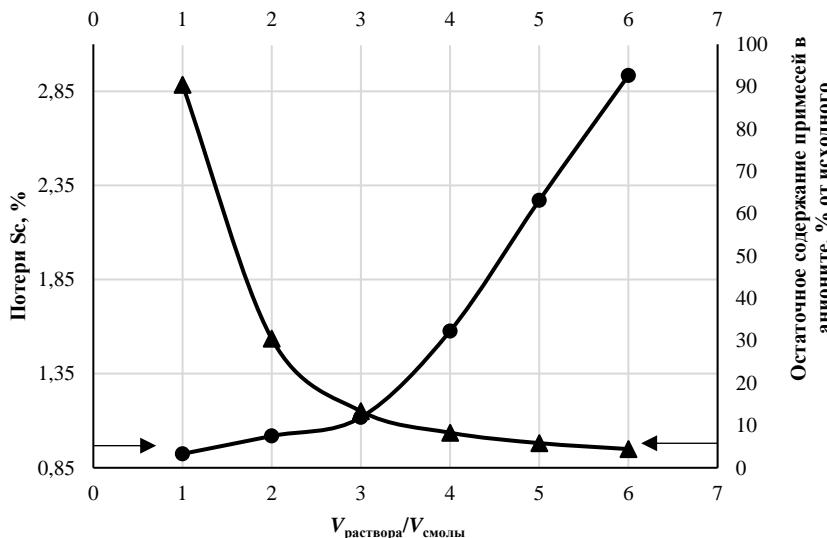


Рис. 1. Влияние соотношения объемов промывного раствора (4 н.  $\text{HNO}_3$ ) и насыщенного анионита на эффективность отмывки насыщенного анионита от примесей и величину потерь скандия на операции

Применение азотнокислого раствора в качестве промывочного реагента для насыщенного анионита позволяет достичь максимальной степени удаления примесных ионов, накопившихся в процессе сорбции, при этом практически не вызывая вымывания целевого металла из матрицы сорбента. Высокая эффективность промывки анионита раствором азотной кислоты обусловлена тем, что нитрат-ионы проявляют более высокое сродство к ионообменным группам сорбента по сравнению с анионами примесей. При этом конкурирование нитрат-ионов с ионами скандия выражено слабо, что и предотвращает значительные потери целевого металла.

**Десорбция скандия из фазы насыщенного анионита  
карбонатсодержащими растворами**

Насыщенный скандием и промытый кислотой анионит загружали в четыре однотипные сорбционные колонки. Анионит содержал 32,1 г/дм<sup>3</sup> Sc. Через заполненные сорбционные колонки пропускали десорбирующй раствор (ДР) карбоната аммония концентрацией 100, 150, 200 и 300 г/дм<sup>3</sup> со скоростью 1 к.о./ч. Всего пропускали 8 объемов десорбирующего раствора на один объем анионита. Каждый объем выходящего из колонки десорбата анализировали на содержание скандия. После этого аниониты из колонок выгружали и определяли в них содержание скандия. Рассчитывали степень извлечения скандия из насыщенного анионита в десорбат после каждого пропущенного удельного объема раствора. Остаточное содержание скандия во всех образцах анионитов после десорбции составляло 3–4 мг/дм<sup>3</sup>.

По полученным данным, представленным в табл. 3 можно видеть, что при концентрации карбоната аммония в десорбирующем растворе 100 г/дм<sup>3</sup> в первых двух фракциях наблюдалось выпадение осадка. Это означает, что свободного карбоната аммония, остающегося в десорбате, не хватает для достаточной растворимости карбонатного комплекса скандия. Проведение процесса десорбции в указанных условиях представляет определенные трудности. Установлено, что при концентрации карбоната аммония от 150 г/дм<sup>3</sup> и выше извлечение скандия из анионита происходит с одинаково высокой эффективностью. Дальнейшее повышение содержания карбоната аммония в десорбционном растворе свыше 200 г/дм<sup>3</sup> нецелесообразно, так как это лишь приводит к избыточному расходу реагента. Более того, при последующем осаждении фторида скандия из десорбата возрастает потребность в дополнительном количестве кислоты для нейтрализации раствора, что увеличивает затраты на реагенты.

Таблица 3

**Влияние концентрации раствора  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  и отношения объемов десорбирующего раствора (ДР) к сорбенту на эффективность извлечения скандия из анионита раствором  $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$**

$V_{\text{ДР}}/V_{\text{сорбента}}$	Степень десорбции Sc из анионита, %, при содержании карбоната аммония в десорбирующем растворе, г/дм <sup>3</sup>			
	100	150	200	300
1	27,89 (осадок)	25,21	32,20	37,83
2	65,45 (осадок)	80,70	88,40	92,78
3	94,78	98,90	99,48	99,84
4	99,51	99,94	99,97	99,98
5	99,95	99,98	99,99	100,00
6	99,98	99,99	100,00	100,00
7	99,99	100,00	100,00	100,00
8	100	100	100	100

Следует подчеркнуть, что для достижения эффективной десорбции скандия из анионита при установленном диапазоне концентраций карбоната аммония

достаточно пропустить через колонну 3–4 объема десорбирующего раствора на один объем сорбента. Увеличение же объемного количества десорбирующего раствора приведет лишь к разбавлению десорбата по содержанию скандия и росту расхода реагентов, не обеспечивая при этом дополнительного положительного результата.

Аналогичным методом через заполненные сорбционные колонки пропускали растворы карбоната калия концентрацией 200, 250, 300 и 400 г/дм<sup>3</sup> со скоростью 1 к.о./ч, рассчитывая степень извлечения скандия из насыщенного анионита в десорбат после каждого пропущенного удельного объема раствора (табл. 4).

Таблица 4

**Влияние концентрации раствора  $K_2CO_3$  и отношения объемов десорбирующего раствора к аниониту на эффективность извлечения скандия из анионита раствором  $K_2CO_3$**

$V_{dp}/V_i$	Степень десорбции Sc из анионита, %, при содержании карбоната калия в десорбирующем растворе, г/дм <sup>3</sup>			
	200	250	300	400
1	0,35	3,21	5,43	27,75
2	1,77	69,71	78,13	73,31
3	14,89	81,24	89,78	84,84
4	34,76	92,43	93,08	92,13
5	59,41	95,15	95,08	96,41
6	81,65	97,57	95,70	99,14
7	92,47	97,71	95,97	99,75
8	96,35	98,14	96,16	99,90

По полученным результатам эксперимента возможно полагать, что при концентрации карбоната калия в десорбирующем растворе на уровне 200 г/дм<sup>3</sup> процесс десорбции скандия протекает недостаточно эффективно. Для полного извлечения требуется пропускать через колонну не менее 8 объемов раствора на один объем анионита. При увеличении концентрации карбоната калия до 250 г/дм<sup>3</sup> и выше эффективность десорбции стабилизируется, и для извлечения свыше 95% скандия достаточно использовать 5–6 объемов десорбирующего раствора на объем анионита. Таким образом, дальнейшее повышение концентрации карбоната калия свыше 300 г/дм<sup>3</sup> и увеличение объема раствора сверх 5–6 объемов становится нецелесообразным, поскольку приводит к разбавлению десорбата по содержанию скандия и излишним затратам реагентов без заметного улучшения результатов.

**Осаждение скандия из карбонатсодержащих десорбатов**

Из аммонийно-карбонатного десорбата скандия проводили осаждение трифторида скандия путем добавления раствора концентрированной серной кислоты до достижения концентрации 1 н. в образующейся пульпе. Полученную пульпу трифторида скандия фильтровали с помощью вакуумного фильтра, затем промывали водой и сушили при температуре 98–99°C до постоянной массы.

Анализ полученного фторида скандия показал содержание скандия и контрольных примесей, соответствующее требованиям стандартов, например ОК «Русал» (табл. 5).

Таблица 5

**Состав полученного образца трифторида скандия и нормативные показатели качественного состава, предъявляемые к коммерчески выпускаемому трифториду скандия**

Элементы	Содержание во фториде скандия, %	
	Полученный трифторид скандия (АО «ВНИПИПт»)	Требования (ОК «Русал»)
Sc	39,81	> 35
Fe	0,007	< 0,1
Mg	0,023	< 0,1
Ti	< 0,001	< 0,1
Si	0,025	< 0,1
Zr	< 0,001	< 0,05
Ca	0,008	< 0,5
Th	0,008	—
U	< 0,001	—

Из скандийсодержащего десорбата с концентрацией карбоната калия 300 г/дм<sup>3</sup> осуществляли осаждение оксигидроксида скандия путем добавления раствора едкого калия до достижения концентрации NaOH в пульпе 5 г/дм<sup>3</sup>. Полученную суспензию оксигидроксида фильтровали с использованием вакуумного фильтра, промывали водой и сушили при температуре 98–99°C до постоянной массы. Полученный оксигидроксид скандия анализировали на содержание скандия и лимитируемых примесей (табл. 6).

Таблица 6

**Состав полученных образцов оксигидроксида скандия, оксида скандия и нормативные показатели качественного состава, предъявляемые к коммерчески выпускаемому оксиду скандия**

Элементы	Содержание, %			
	Полученные образцы АО «ВНИПИПромтехнологии»		Требования к оксиду скандия ТУ 95.148–77	
	ScO(OH) (в пересчете на оксиды)	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ОС-99,9	ОС-99,0
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,51	99,97	99,9	99,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0368	< 0,001	0,003	0,01
CuO	< 0,0015	< 0,001	0,005	0,01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0435	0,003	0,005	0,05
MgO	0,0217	< 0,001	0,003	0,01
MnO <sub>2</sub>	0,00019	< 0,001	0,003	0,01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,0055	0,005	0,01	0,02
TiO <sub>2</sub>	0,243	< 0,001	0,005	0,05
SiO <sub>2</sub>	< 0,0026	< 0,001	0,01	0,05
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0153	0,002	0,005	0,05
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0056	< 0,001	0,005	0,05
ZrO <sub>2</sub>	0,0016	< 0,001	0,005	0,1
CaO	0,080	0,005	0,01	0,05
ThO <sub>2</sub>	0,030	0,007	0,01 (СкО-3 ТУ 48-4-417-87)	

Далее осадок подвергали очистке путем однократного переосаждения в форме оксалата скандия с последующим прокаливанием до оксида скандия согласно отработанной технологии, описание некоторых условий процессов которого наиболее детально отражено в работе [19]. Анализ полученного после прокаливания оксигидроксида также включал определение содержания контролируемых примесей (см. табл. 6).

Согласно данным табл. 6, оксид скандия, полученный после одной стадии очистки оксалатом, соответствует требованиям ТУ 95.148-77 (ОС-99,9).

### **Заключение и выводы**

Наиболее эффективные результаты по сорбции скандия из фтористоводородных десорбатов получены с использованием слабоосновного анионита, содержащего в качестве ионообменных групп первичные аминогруппы. ПДОЕ анионита при содержании фторид-иона во фтористоводородном растворе порядка 2 М составляет порядка 49,7 г/дм<sup>3</sup>.

На основании экспериментальных результатов установлены оптимальные параметры промывки насыщенного слабоосновного анионита раствором серной или азотной кислоты, а также условия десорбции скандия с использованием растворов карбоната калия и карбоната аммония. Установлена возможность прямого осаждения скандийсодержащих продуктов из полученных карбонатных элюатов.

Результаты проведенных исследований показали, что трифторид скандия, полученный по предложенной схеме, полностью соответствует техническим требованиям, предъявляемым к фториду скандия ОК «Русал», а образующийся при щелочном осаждении оксигидроксид скандия пригоден для дальнейшей переработки методом однократного оксалатного переосаждения. Оксид скандия, выделенный из карбонатного десорбата, отвечает стандартам по содержанию основного вещества и примесей для оксида чистотой 99,9%, необходимой для последующего получения алюмо-скандиевых лигатур и металлического скандия. По результатам проведенных лабораторных работ в Федеральную службу по интеллектуальной собственности подана заявка на изобретение: «Способ переработки скандийсодержащего раствора уранового производства» № 2024118203 от 26.06.2024.

Таким образом, на основании полученных данных предложен новый способ сорбционного извлечения скандия из фтористоводородных скандийсодержащих элюатов участка попутной добычи скандия на урановом производстве АО «Далур». Подобный подход направлен на сокращение потерь целевого металла на промежуточных этапах, что, в свою очередь, обеспечивает повышение степени извлечения скандия в готовый продукт. Расчетное сквозное извлечение скандия из плавиковокислого десорбата как в трифторид скандия, так и в оксигидроксид скандия составляет не менее 95%, что более чем на 30% превышает показатели действующей схемы.

Реализация предложенной схемы также предполагает возможность интеграции процесса в существующую технологическую линию скандиевого

производства без существенной реконструкции оборудования, что повышает ее промышленную применимость.

### **Список источников**

1. Яценко С.П., Скачков В.М., Пасечник Л.А. Получение богатых алюминиевых лигатур, содержащих скандий, иттрий, цирконий, для цветной и черной металлургии // Цветные металлы. 2020. № 8. С. 49–55.
2. Яценко С.П., Скачков В.М., Пасечник Л.А., Овсянников Б.В. Цикл производства алюмоскандиевой лигатуры и сплавов // Цветные металлы. 2020. № 3. С. 68–73.
3. Пасечник Л.А., Пягай И.Н., Скачков В.М., Ященко С.П. Извлечение редких элементов из отвального шлама глиноземного производства с использованием отходящих газов печей спекания // Экология и промышленность России. 2013. № 6. С. 36–38.
4. Costis S., Mueller K., Coudert L., Neculita C.M., Reynier N., Blais J. Recovery potential of rare earth elements from mining and industrial residues: A review and cases studies // Journal of Geochemical Exploration. 2021. Vol. 221. P. 1–14.
5. Weng Z., Mudd G., Haque N., Jowitt S. Assessing rare earth element mineral deposit types and links to environmental impacts // Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B). 2013. Vol. 122. P. 83–96.
6. Смышляев В.Ю. О попутной добыче скандия из продуктивных растворов подземного выщелачивания на Далматовском месторождении урана // Горный журнал. 2017. № 8. С. 28–32.
7. Татарников А.В., Михайленко М.А., Мешков Е.Ю., Андреева С.И. Изучение некоторых фосфорсодержащих ионитов применительно к гидрометаллургии редкоземельных металлов // Цветные металлы. 2023. № 6. С. 25–30.
8. Лаверов Н.П., Лисицын А.К., Соловьев И.Н. Урансодержащие полиэлементные экзогенные эпигенетические месторождения: условия образования и источники металлов, извлекаемых методами подземного выщелачивания // Геология рудных месторождений. 2000. № 42. С. 5–24.
9. Тураев С. и др. Распределение и формы нахождения элементов в технологических растворах подземного выщелачивания. Ташкент : Ин-т ядерной физики, 1989. 19 с. (Препринт АН УзССР, Ин-т ядер. физики; Р-3-446).
10. Соловьев А.А., Мешков Е.Ю., Бобыренко Н.А., Парыгин И.А. Определение возможности сорбционного концентрирования скандия и редкоземельных металлов из возвратных растворов скважинного подземного выщелачивания урана // Цветные металлы. 2018. № 7. С. 6–12.
11. Мешков Е.Ю., Акимова И.Д., Бобыренко Н.А., Соловьев А.А., Клочкова Н.В., Савельев А.А. Разделение скандия и тория при переработке чернового скандиевого концентрата, полученного из возвратных растворов подземного выщелачивания урана // Радиохимия. 2020. № 62. С. 440–445.
12. Соколова Ю.В., Пироженко К.Ю. Сорбция скандия из сернокислых растворов с использованием фосфорсодержащих ионитов промышленных марок // Сорбционные и хроматографические процессы. 2015. № 15. С. 563–570.
13. Altinsel Y. et al. Extraction of Scandium from Lateritic Nickel-Cobalt Ore Leach Solution by Ion Exchange: A Special Study and Literature Review on Previous Works // Light Metals 2018 : Conferences Paper. P. 1545–1553. (The Minerals, Metals & Materials Series).
14. Шокобаев Н.М. Разработка технологий комплексной переработки руд экзогенных месторождений урана с попутным извлечением рения, скандия и редкоземельных металлов : дис. ... PhD. Алматы, 2015.
15. Ouardi Y.E. et al. The recent progress of ion exchange for the separation of rare earths from secondary resources – a review // Hydrometallurgy. 2023. Vol. 218. P. 1–20.

16. Shenxu B. et al. Scandium Loading on Chelating and Solvent Impregnated Resin from Sulfate Solution // Solvent Extraction and Ion Exchange. 2017. Vol. 36. P. 100–113.
17. Кондруцкий Д.А., Кириллов Е.В. и др. Твердый экстрагент с высокой динамической обменной емкостью для извлечения скандия и способ его получения : изобретение RU2650410 С1 РФ, 2017.
18. Буньков Г.М. Разработка технологии извлечения скандия из растворов подземного выщелачивания урана : дис. .... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2019.
19. Pat. US 10968112 B2. Method for producing high-purity scandium oxide / Tatsuya Higaki, Hiroshi Kobayashi. Filed Jan. 23, 2019. Published Apr. 6, 2021.

### References

1. Yatsenko S. P., Skachkov V. M., Pasechnik L. A. Poluchenie bogatykh alyuminievykh ligatur, soderzhashchikh skandiy, ittriy, tsirkoniyya, dlya tsvetnoy i chernoy metallurgii [Obtaining rich aluminum alloys containing scandium, yttrium, zirconium for non-ferrous and ferrous metallurgy] // *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals]. 2020. No. 8. P. 49–55.
2. Yatsenko S. P., Skachkov V. M., Pasechnik L. A., Ovsyannikov B. V. Tsikl proizvodstva alyumoskandievoy ligatury i splavov [Production cycle of aluminum-scandium alloy and alloys] // *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals]. 2020. No. 3. P. 68–73.
3. Pasechnik L. A., Pyagay I. N., Skachkov V. M., Yashchenko S. P. Izvlechenie redkikh elementov iz otval'nogo shlama glinozemnogo proizvodstva s ispol'zovaniem otkhodyashchikh gazov pechey spekaniya [Extraction of rare elements from alumina production tailings using waste gases from sintering furnaces] // *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia]. 2013. No. 6. P. 36–38.
4. Costis, S.; Mueller, K.; Coudert, L.; Neculita, C.M.; Reynier, N.; Blais, J. Recovery potential of rare earth elements from mining and industrial residues: A review and cases studies. *Journal of Geochemical Exploration*. 2021, 221, 1–14.
5. Weng, Z.; Mudd, G.; Haque, N.; Jowitt, S. Assessing rare earth element mineral deposit types and links to environmental impacts. *Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B)*. 2013, 122, 83–96.
6. Smyshlyayev V. Yu. O poputnoy dobyche skandiya iz produktivnykh rastvorov podzemnogo vyshchelachivaniya na Dalmatovskom mestorozhdenii urana [On the by-product recovery of scandium from productive solutions of underground leaching at the Dalmatovskoye uranium deposit] // *Gornyy zhurnal* [Mining Journal]. 2017. No. 8. P. 28–32.
7. Tatarnikov A. V., Mikhaylenko M. A., Meshkov E. Yu., Andreeva S. I. Izuchenie nekotorykh fosforsoderzhashchikh ionitov primenitel'no k gidrometallurgii redkozemel'nykh metallov [Study of certain phosphorus-containing ion exchangers for use in hydrometallurgy of rare earth metals] // *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals]. 2023. No. 6. P. 25–30.
8. Laverov N. P., Lisitsin A. K., Solodov I. N. Uransoderzhashchie polielementnye ekzogennye epigeneticheskie mestorozhdeniya: usloviya obrazovaniya i istochniki metallov, izvlekaemykh metodami podzemnogo vyshchelachivaniya [Uranium-bearing polyelement exogenous epigenetic deposits: conditions of formation and sources of metals extracted by underground leaching methods] // *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy* [Geology of Ore Deposits]. 2000. Vol. 42. P. 5–24.
9. Turaev S. et al. *Raspredelenie i formy nakhozhdeniya elementov v tekhnologicheskikh rastvorakh podzemnogo vyshchelachivaniya* [Distribution and forms of elements in underground leaching solutions]. Tashkent: Institute of Nuclear Physics, 1989. 19 p.
10. Solov'ev A. A., Meshkov E. Yu., Bobyrenko N. A., Parygin I. A. Opredelenie vozmozhnosti sorbcionnogo kontsentrirovaniya skandiya i redkozemel'nykh metallov iz vozvratnykh rastvorov skvazhinnogo podzemnogo vyshchelachivaniya urana [Determination of the possibility of sorption concentration of scandium and rare earth metals from return solutions of underground uranium leaching wells] // *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals]. 2 Desktop. No. 7. P. 6–12.

11. Meshkov E. Yu., Akimova I. D., Bobyrenko N. A., Solov'ev A. A., Klochkova N. V., Savel'ev A. A. Razdelenie skandiya i toriya pri pererabotke chernovogo skandievogo kontsentrata, poluchennogo iz vozvratnykh rastvorov podzemnogo vyshchelachivaniya urana [Separation of scandium and thorium during the processing of crude scandium concentrate obtained from return solutions from underground uranium leaching] // *Radiokhimiya* [Radiochemistry]. 2020. Vol. 62. P. 440–445.
12. Sokolova Yu. V., Pirozhenko K. Yu. Sorbtsia skandiya iz sernokislykh rastvorov s ispol'zovaniem fosforsoderzhashchikh ionitov promyshlennyykh marok [Sorption of scandium from sulfuric acid solutions using phosphorus-containing ion exchangers of industrial grades] // *Sorbionnye i khromatograficheskie protsessy* [Sorptive and Chromatographic Processes]. 2015. Vol. 15. P. 563–570.
13. Altinsel, Y. et al. *Extraction of Scandium from Lateritic Nickel-Cobalt Ore Leach Solution by Ion Exchange: A Special Study and Literature Review on Previous Works*. Light Metals; The Minerals, Metals & Materials Series, 2018. pp. 1545–1553.
14. Shokobaev N. M. *Razrabotka tekhnologiy kompleksnoy pererabotki rud ekzogennykh mestorozhdeniy urana s poputnym izvlecheniem reniya, skandiya i redkozemel'nykh metallov* [Development of technologies for the comprehensive processing of ores from exogenous uranium deposits with the simultaneous extraction of rhenium, scandium, and rare earth metals]. PhD thesis. Almaty, 2015.
15. Ouardi, Y. E. et al. The recent progress of ion exchange for the separation of rare earths from secondary resources – A review. *Hydrometallurgy*. 2023, 218, 1–20.
16. Shenxu, B. et al. Scandium Loading on Chelating and Solvent Impregnated Resin from Sulfate Solution. *Solvent Extraction and Ion Exchange*. 2017, 36, 100–113.
17. Kondruckiy D. A., Kirillov E. V. et al. *Tverdyy ekstragent s vysokoy dinamicheskoy obmennoy emkost'yu dlya izvlecheniya skandiya i sposob ego polucheniya* [Solid extractant with high dynamic exchange capacity for the extraction of scandium and method for its preparation]. Patent RU2650410 C1, Russian Federation, 2017.
18. Bun'kov G. M. *Razrabotka tekhnologii izvlecheniya skandiya iz rastvorov podzemnogo vyshchelachivaniya urana* [Development of technology for extracting scandium from underground uranium leaching solutions]. Candidate of Technical Sciences thesis. Yekaterinburg, 2019.
19. Patent US 10968112 B2. *Method for producing high-purity scandium oxide* / Tatsuya Higaki, Hiroshi Kobayashi. Filed Jan. 23, 2019. Published Apr. 6, 2021.

**Сведения об авторах:**

**Татарников Алексей Викторович** – начальник группы ионного обмена АО «ВНИПИ-промтехнологии» (Москва, Россия). E-mail: Tatarnikov.A.V@vnipipt.ru

**Андреева Софья Иннокентьевна** – старший специалист АО «ВНИПИПромтехнологии» (Москва, Россия). E-mail: Andreeva.S.I@vnipipt.ru

**Соловьев Алексей Александрович** – кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела комплексной переработки сырья АО «ВНИПИПромтехнологии» (Москва, Россия). E-mail: Solovev.A.A@vnipipt.ru

**Мешков Евгений Юрьевич** – начальник научно-исследовательской лаборатории гидрометаллургических технологий АО «ВНИПИПромтехнологии» (Москва, Россия). E-mail: Meshkov.E.J@vnipipt.ru

**Трошкова Ирина Дмитриевна** – доктор технических наук, профессор Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева (Москва, Россия). E-mail: troshkina.i.d@muctr.ru

**Лавров Антон Сергеевич** – начальник производственного отдела – заместитель директора по производству АО «Далур» (Москва, Россия). E-mail: AnSeLavrov@rosatom.ru

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

***Information about the authors:***

**Tatarnikov Alexey V.** – Head of the Ion Exchange Group, JSC “Design-Prospecting and Scientific Research Institute of Industrial Technologies” (Moscow, Russian Federation). E-mail: Tatarnikov.A.V@vnipipt.ru

**Andreeva Sofia I.** – Senior Specialist, JSC “Design-Prospecting and Scientific Research Institute of Industrial Technologies” (Moscow, Russian Federation). E-mail: Andreeva.S.I@vnipipt.ru  
**Solovyov Alexey A.** – Candidate of Technical Sciences, Head of the Research Department for Comprehensive Raw Material Processing, JSC “Design-Prospecting and Scientific Research Institute of Industrial Technologies” (Moscow, Russian Federation). E-mail: Solovev.A.A@vnipipt.ru

**Meshkov Evgeny Yu.** – Head of the Research Laboratory for Hydrometallurgical Technologies, JSC “Design-Prospecting and Scientific Research Institute of Industrial Technologies” (Moscow, Russian Federation). E-mail: Meshkov.E.J@vnipipt.ru

**Troshkina Irina D.** – Doctor of Technical Sciences, Professor, D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Moscow, Russian Federation). E-mail: troshkina.i.d@muctr.ru

**Lavrov Anton S.**, Head of Production Department – Deputy Director for Production, JSC “Dalu” (Uksyanskoe, Russian Federation). E-mail: AnSeLavrov@rosatom.ru

***Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.***

***The authors declare no conflicts of interests.***

*The article was submitted 12.09.2025; accepted for publication 07.11.2025*  
*Статья поступила в редакцию 12.09.2025; принята к публикации 07.11.2025*