

УДК 669.793
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4745
Шифр специальности ВАК: 2.6.7
Научная статья

Комплексная технология переработки диопсида с получением скандиевого концентрата и минеральных продуктов

А.Д. Зайцева^{1✉}, Е.Н. Кузин¹, Н.Е. Кручинина¹, С.С. Галактионов², А.Н. Краснощеков²

¹ Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Россия, г. Москва

² Акционерное общество «Леоли Кэпитал Групп», Россия, г. Москва

✉ zaicevaaleksandra95@gmail.com

Аннотация. Актуальность. Вопросам поиска новых сырьевых источников редкоземельных и рассеянных металлов уделяется все больше внимания. Диопсид – новый и весьма перспективный источник добычи соединений скандия, позволяющий получать широкий спектр неорганических продуктов, обеспечивающих экономическую целесообразность производства. **Цель.** Разработка комплексной энерго- и ресурсосберегающей технологии переработки диопсида с получением скандиевого концентрата и широкого спектра неорганических продуктов. **Методы.** Для исследования состава кислых растворов использовали метод атомно-эмиссионной спектроскопии с магнитной плазмой. **Результаты и выводы.** Получены образцы импрегнатов на основе макропористых активированных углей, пропитанных смесью Д23ДФК/ТБФ. Полученные образцы продемонстрировали высокую емкость по отношению к соединениям скандия, а отказ от жидкостной экстракции позволит существенно повысить уровень производственной безопасности. Использование двух инновационных реэкстрагентов на основе смеси аммонийных солей или оксиэтилидендифосфоновой кислоты позволяет улучшить экологические и экономические показатели процесса реэкстракции. Впервые предложена технология соосаждения соединений скандия с использованием оксидов кальция/магния. Прокаленный скандийсодержащий концентрат содержит от 0,8 до 1,4 % скандия. Маточные растворы процесса вскрытия могут быть нейтрализованы с использованием магнийсодержащих отходов с получением сульфата магния – ценного материала для строительной, сельскохозяйственной и иных отраслей промышленности. Осадки процесса нейтрализации могут быть частично возвращены на стадию вскрытия диопсида или использованы в качестве сырья для производства комплексных титансодержащих коагулянтов. Разработанная на основе совокупности технологических приемов концепт-схема является комплексной и сопровождается минимальным образованием сточных вод и твердых отходов.

Ключевые слова: диопсид, скандий, импрегнат, реэкстракция, сульфат магния

Для цитирования: Комплексная технология переработки диопсида с получением скандиевого концентрата и минеральных продуктов / А.Д. Зайцева, Е.Н. Кузин, Н.Е. Кручинина, С.С. Галактионов, А.Н. Краснощеков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 6. – С. 69–77. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4745

UDC 669.793
DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4745
Scientific paper

Complex technology for processing diopside to produce scandium concentrate and mineral products

A.D. Zaytseva^{1✉}, E.N. Kuzin¹, N.E. Kruchinina¹, S.S. Galaktionov², A.N. Krasnoshchekov²

¹ D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russian Federation

² LTD «Leoli Capital Group», Moscow, Russian Federation

✉ zaicevaaleksandra95@gmail.com

Abstract. Relevance. More and more attention is being paid to the search for new raw materials sources of rare earth and trace metals. Diopside is a new and very promising source for the extraction of scandium compounds, which makes it possible to obtain a wide range of inorganic products that ensure economic feasibility of production. **Aim.** Development of a comprehensive energy- and resource-saving technology for diopside processing to produce scandium concentrate and a wide range of inorganic products. **Methods.** To study the composition of acidic solutions, the method of atomic emission spectroscopy with magnetic plasma was used. **Results and conclusions.** The authors have obtained the samples of impregnates based on macroporous activated carbons impregnated with a D2EDPA/TBP mixture. The obtained samples demonstrated a high capacity with respect to scandium compounds, and the abandonment of liquid extraction will significantly increase the level of industrial safety. The use of two innovative re-extractants based on a mixture of ammonium salts or oxyethylidene diphosphonic acid makes it possible to improve the environmental and economic performance of re-extraction. The authors proposed the technology for co-precipitation of scandium compounds using calcium/magnesium oxides. Calcined scandium-containing concentrate contains from 0.8 to 1.4% scandium. The mother liquors of the opening process can be neutralized using magnesium-containing waste to obtain magnesium sulfate, a valuable material for construction, agricultural and other industries. The residues from neutralization can be partially returned to the stage of opening the diopside or used as raw materials for the production of complex titanium-containing coagulants. Developed on the basis of a set of technological methods, the concept scheme is comprehensive and is accompanied by minimal generation of wastewater and solid waste.

Keywords: diopside, scandium, impregnate, stripping, magnesium sulfate

For citation: Zaytseva A.D., Kuzin E.N., Kruchinina N.E., Galaktionov S.S., Krasnoshchekov A.N. Complex technology for processing diopside to produce scandium concentrate and mineral products. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 69–77. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/4745

Введение

Реализация концепций устойчивого развития и Zero Waste делает все более актуальным вопрос комплексной переработки минерального сырья. Миллионы тонн «некондиционных» концентратов (отходов) и вскрышных пород извлекаются в процессе добычи целевого компонента и за неимением подходящих технологий переработки размещаются на постоянное хранение на хвостохранилищах и шлакоотвалах предприятий, приобретая статус отходов.

С учетом необходимости перехода к экономике замкнутого цикла, сложной геополитической ситуацией и глобальными геополитическими вызовами основной задачей России является самообеспечение всеми стратегическими ресурсами. Именно по уровню развития науки и техники в направлении комплексной переработки сырья и промышленных отходов можно судить о стабильности промышленного производства страны.

Наиболее уязвимыми направлениями сырьевой безопасности большинства стран являются производства редкоземельных (РЗЭ) и рассеянных металлов. Данные металлы широко востребованы в аэрокосмической, электротехнической, медицинской и других инновационных отраслях. Даже при наличии существенных запасов минералов большинство стран не имеет экономически обоснованной технологии их переработки с извлечением РЗЭ. Именно поэтому большая часть стран зависима от поставок из Китая – монополиста на рынке переработки и продажи редкоземельных концентратов.

Одним из наиболее востребованных РЗЭ является скандий [1–3]. Высокий спрос на данный металл обусловлен его необычными свойствами. До-

бавка всего 2–5 мас. % к алюминию позволяет значительно увеличить прочность сплава, что делает полученный материал жизненно важным для самолето-, ракето- и автомобилестроения.

В настоящее время разработано несколько лабораторных и полупромышленных технологий добычи скандия из широкого спектра техногенных отходов [4]. Красный шлам [5], зола ТЭЦ [6], гидролизная серная кислота и ильменитовые шлаки [7, 8], бокситы [9, 10], кремнистые остатки [11] и даже маточные растворы подземного выщелачивания урана [12, 13] – вот основные источники добычи скандия, рассматриваемые в настоящее время.

Производство скандия – сложный, многостадийный процесс, включающий жидкостную экстракцию растворами фосфорорганических кислот в керосине и рекстракцию высокотоксичным и дорогостоящим фтороводородом [14–16]. Применение процессов твердофазной экстракции с использованием коммерческих смол, несмотря на высокую эффективность, отличается высокой стоимостью и сложной аппаратурной схемой. Учитывая вышесказанное, можно сделать вывод, что высокий уровень промышленной и экологической опасности, а также низкая рентабельность процессов существенно тормозят их внедрение в промышленность.

В качестве альтернативного и перспективного источника соединений скандия можно выделить диопсид ($\text{CaMg}(\text{Si}_2\text{O}_6)$) – минерал из группы пироксенов, содержание соединений скандия в котором достигает 200 г/т. Высокая химическая активность и наличие легкоизвлекаемых соединений магния делают диопсид одним из возможных источников для добычи соединений скандия и реали-

зации комплексной переработки минерального сырья.

Основной целью данного исследования является разработка комплексной энерго- и ресурсосберегающей технологии переработки диопсида с получением скандиевого концентрата и широкого спектра неорганических продуктов.

Материалы и методы исследования

Объект исследования – диопсид Качканарского месторождения с содержанием соединений скандия 120 г/т. Скандийсодержащие растворы получали обработкой измельченного до 75 мкм диопсида 40–50 %-ным раствором H_2SO_4 с добавкой 20 г/дм³ фторсиликата натрия при температуре 95 °С в течение 5–6 часов и Т:Ж 1:1 (рис. 4, стадия 1). Полученную пульпу разбавляли, декантировали, фильтровали и направляли на извлечение соединений скандия (рис. 4, стадия 2).

Определение содержания металлов в кислых растворах проводили методом атомно-эмиссионной спектроскопии с магнитной плазмой на приборе Спектроскай (г. Королев, Россия) [17–19].

Процесс твердофазной экстракции проводили в ионообменной колонке высотой 45 см; высотой загрузки 40 см; сечением 2,5 см²; объемом твердого экстрагента 100 см³; линейная скорость фильтрации 2 м/ч. В качестве твердого экстрагента использовали твердый углеродный экстрагент (ТВЭКС-У) (плотность 1,05 г/дм³) на основе макропористого активированного угля, импрегнированного эквимолярной смесью ди2Этилгексилфосфоновой кислоты (Д2ЭГФК) и трибутилфосфата (ТБФ). В качестве образца сравнения был выбран коммерческий твердый экстрагент (ТВЭКС-С) на основе стиролдивинилбензольной матрицы и Д2ЭГФК/ТБФ (рис. 4, стадия 3).

Реэкстракцию соединений скандия из ТВЭКС-С/ТВЭКС-У проводили раствором оксиэтилендифосфоновой кислоты (ОДФК) с концентрацией 330 г/дм³ или смесью 8 %-ного раствора бифторида аммония с добавкой 100 г/дм³ сульфата аммония (рис. 4, стадия 4).

Нейтрализацию маточного раствора проводили в реакторе с верхнеприводной мешалкой, оборудованном датчиком контроля pH на базе иономера И-160 (Россия). Образующиеся труднорастворимые продукты декантировали, а полученный раствор фильтровали на вакуумном фильтре.

Сушку маточных растворов проводили при помощи лабораторного ротерного испарителя Stegler R I-213 (Китай).

Элементный состав твердых образцов определяли на рентгенофлуоресцентном электронном микроскопе JEOL1610LV с энергодисперсионной приставкой SSD X-MaxIncaEnergy (JEOL, Япония;

Oxford Instruments, Великобритания). Фазовый состав определяли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 Н (Россия).

Результаты и их обсуждение

Химический состав растворов сернокислотного вскрытия диопсида, используемых в экспериментах, представлен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав раствора процесса переработки диопсида с попутным извлечением скандия

Table 1. Chemical composition of the diopside processing solution with associated scandium extraction

Показатель/Index	Sc	Ti	Ca	Fe	Mg	Al	H ₂ SO ₄	F
Содержание, г/дм ³ Content, g/dm ³	0,014	0,65	0,42	10,1	17,9	6,15	116,4	21,1

Из данных табл. 1 видно, что содержание соединений скандия в технологических растворах не превышает 15 мг/дм³, а значит, применение жидкостной экстракции нецелесообразно как с технологической, так и с экономической точки зрения.

С целью повышения уровня производственной безопасности было принято решение об отказе от использования жидкофазной экстракции в пользу твердофазной. Данные по полной обменной емкости представлены на графике рис. 1.

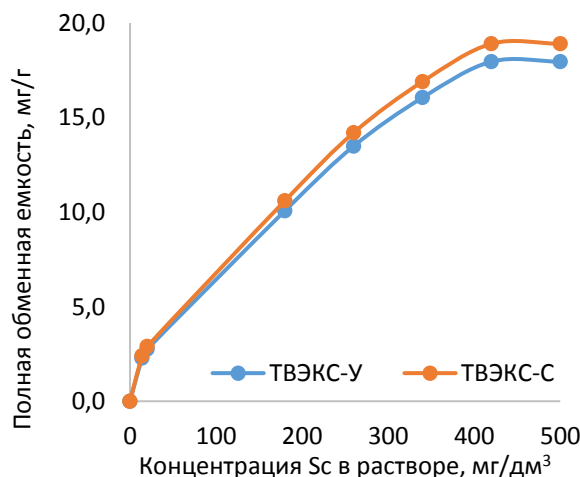


Рис. 1. Полная обменная емкость образцов
Fig. 1. Total sample exchange capacity

Из представленных на рис. 1 данных видно, что по своей эффективности предлагаемый ТВЭКС-У не уступает коммерческому ТВЭКС-С, при этом стоимость ТВЭКС-У в среднем в 10 раз ниже. Немаловажен тот факт, что в случае нарушения технологических условий и вымывания экстракции

онной смеси с поверхности ТВЭКС-У возможно восстановить его свойства в процессе повторной пропитки. Нарушение режимов эксплуатации ТВЭКС-С ведет к полной утрате его свойств и необходимости полной замены, что с учетом высокой стоимости реагента можно считать экономическим риском. Кроме того, ТВЭКС-У обладает дополнительным преимуществом по сравнению с ТВЭКС-С, так как первый имеет большую плотность и не всплывает на поверхности технологических растворов. Это позволяет упростить аппаратное решение для ведения технологического процесса. Селективность извлечения скандия ТВЭКС-У превышает 95–99 %, при этом наблюдается минимальная (1–3 %) экстракция алюминия, железа, кальция и магния.

Результаты исследования динамической емкости приведены на графике рис. 2.

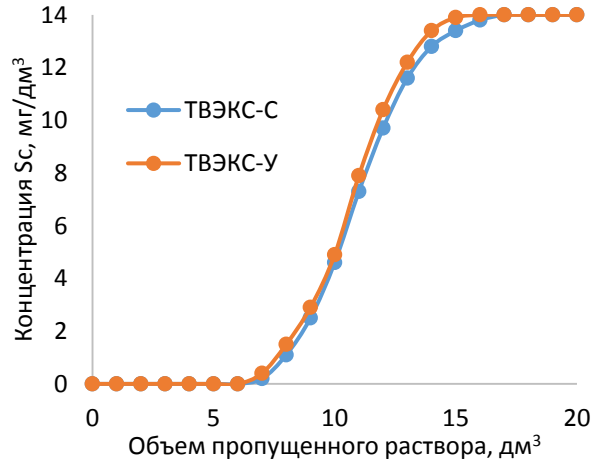


Рис. 2. Экстракция скандия из сернокислотного раствора вскрытия диопсида
Fig. 2. Scandium extraction from sulfuric acid solution of diopside opening

Из данных рис. 2 видно, что по эффективности экстракции ТВЭКС-У незначительно уступает коммерческому ТВЭКС-С, при этом динамическая обменная емкость для образца ТВЭКС составила 2,05 мг/г, а для ТВЭКС-У – 1,95 мг/г.

Исследование процесса реэкстракции соединений скандия растворами ОДФК или смесью аммонийных солей с поверхности ТВЭКС-У и ТВЭКС-С проводили в динамическом режиме в описанной ранее колонке. Режим пропускания жидкости – противоток, линейная скорость 4 м/ч. Полученные в результате эксперимента кривые извлечения скандия представлены на рис. 3.

Из данных графика рис. 3 видно, что процесс реэкстракции при использовании ОДФК протекает более интенсивно в сравнении с фторидным реэкс-

трагентом. Данное явление можно объяснить образованием более прочных комплексов скандия с молекулами ОДФК.

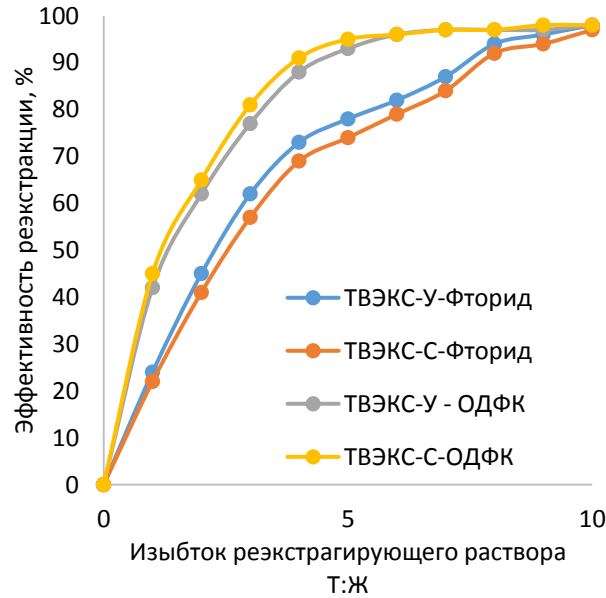


Рис. 3. Реэкстракция скандия с поверхности ТВЭКС-С и ТВЭКС-У
Fig. 3. Scandium re-extraction from the surface of TVEX-S and TVEX-C

Осаждение соединений скандия из полученных растворов десорбции ОДФК проводили оксидами кальция и магния при соотношении Т:Ж 1:25 (рис. 4, стадия 5). Полученные осадки прокаливали при 1100 °С в течение 2 часов с получением скандийсодержащего концентрата (рис. 4, стадия 6). Результаты эксперимента представлены в табл. 2. По своему химическому составу скандийсодержащий концентрат представляет собой смесь фосфатов скандия и металла-осадителя (кальция/магния).

Таблица 2. Эффективность осаждения соединений скандия из реэкстрактов
Table 2. Efficiency of precipitation of scandium compounds from re-extracts

Реэкстрагент-осадитель Re-extractant-precipitator	Эффективность осаждения Sc из реэкстрактов Efficiency of Sc precipitation from re-extracts	Содержание Sc в концентрате Sc content in concentrate
	%	
ОДФК-CaO ODFK -CaO	75	1,31
ОДФК-MgO ODFK-MgO	99	1,92
Фторид-CaO Fluoride-CaO	91	0,82
Фторид-MgO Fluoride-MgO	99	0,91

Из данных табл. 2 видно, что применение оксидов кальция и магния в качестве осадителей позволяет количественно выделять соединения скандия, при этом эффективность соединений магния выше, чем у соединений кальция, что объясняется более прочными комплексами в системе ОДФК/фторид-магний-скандий.

После экстракции рафинат, обедненный по скандию, представляет собой сульфатный раствор магния, кальция, алюминия и железа с высоким содержанием свободной серной кислоты (110 г/дм^3) и относительно низким содержанием фторидов. Нейтрализацию рафината (рис. 4, стадия 7) проводили суспензией оксида магния или бруситсодержащим отходом производства огнеупоров до pH 7,5–8,0 [19]. Данные по остаточным содержаниям металлов и расходу нейтрализующего реагента представлены в табл. 3.

Полученные результаты (табл. 3) свидетельствуют о том, что содержание магния в растворе составляет 40–45 г/л, или 400–500 г/л по $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, а содержание других металлов находится на уровне примесей.

Химический анализ высушенного осадка процесса нейтрализации (рис. 4, стадия 8) показал, что основными фазами являются непрореагировавший оксид магния и смесь фторидов магния, кальция, алюминия и титана. Данный отход может быть использован в качестве фторсодержащего сырья и направлен обратно на стадию сернокислотного вскрытия диопсида для получения более концентрированных по магнию растворов. Возврат отхода на стадию вскрытия будет иметь технологическое преимущество, поскольку позволит рекуперировать большую часть фторидов и магния, а значит, значительно снизить стоимость производства.

Таблица 3. Химический состав растворов, полученных нейтрализацией рафината магниесодержащими реагентами
Table 3. Chemical composition of solutions obtained by neutralizing raffinate with magnesium-containing reagents

Реагент для нейтрализации Neutralization reagent	Содержание, г/дм ³ /Content, g/dm ³						Расход осадителя, г/дм ³ Precipitant consumption, g/dm ³
	Sc	Ti	Ca	Fe	Mg	Al	
Осаждение MgO/MgO precipitation	0,0001	<0,1	0,26	<0,2	43,1	<0,1	140
Осаждение бруситсодержащим отходом Precipitation by brucite-containing waste	0,0001	<0,1	0,39	<0,2	41,4	<0,1	155

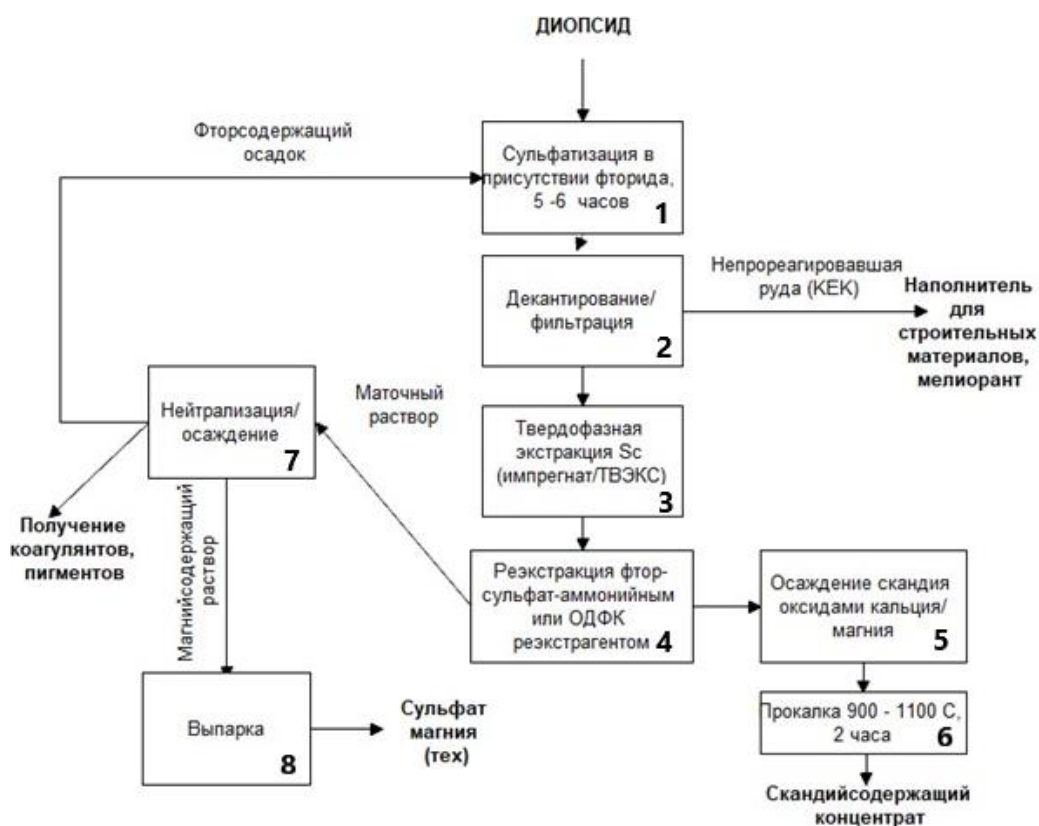


Рис. 4. Схема комплексной переработки диопсида
Fig. 4. Scheme of complex diopside processing

В качестве альтернативного и весьма перспективного направления использования алюмо-железо-титанового осадка можно выделить получение комплексных коагулянтов и их использование для очистки оборотной воды технологического цикла переработки диопсида [20, 21]. Применение высокоэффективных коагулянтов позволит снизить объемы сточных вод и водопотребления и организовать цикл оборотного водоснабжения [22].

Полученные магниенасыщенные растворы высушивали и анализировали на содержание основных компонентов.

Твердый продукт содержал: 94,5 % сульфата магния; 1,8 % диоксид кремния; 0,8 % сульфата кальция; 0,5 % гидроксидов железа и 2,4 % примесей оксидов сульфатов алюминия, калия, натрия и пр.

Продукт, полученный при нейтрализации рафината бруситсодержащим отходом, содержал 92,9 %, сульфата магния 2,1 % диоксид кремния, 1,3 % сульфата кальция, 0,4 % гидроксидов железа и 3,3 % примесей оксидов сульфатов алюминия, калия, натрия и пр.

Таким образом, можно сделать вывод, что полученный сульфат магния имеет низкое содержание примесных элементов и, вероятно, может быть использован в качестве добавок к магниезальным цементам, в целлюлозно-бумажной, текстильной промышленности и при условии доочистки в качестве минерального удобрения.

Все описанные технологические решения (рис. 4) позволят организовать малоотходное производство соединений скандия.

Заключение

В рамках проделанной работы проведен полный цикл исследований по организации энерго- и ресурсосберегающей технологии переработки диопсида с получением скандийсодержащих концентратов

и крупнотоннажных неорганических продуктов.

Отказ от жидкостной экстракции в пользу твердофазной позволит значительно упростить технологическую схему производства и повысить уровень производственной и экологической безопасности. Предложенный ТВЭКС-У на основе макропористого угля по своей емкости лишь незначительно уступает коммерческому ТВЭКС-С при разнице в стоимости почти в 10 раз. Отдельно необходимо отметить, что использование ТВЭКС-У не внесет дополнительных примесей в состав получаемых скандийсодержащих продуктов.

Предложенное инновационное решение по рекстракции соединений скандия с использованием фтор-сульфат-аммонийной системы и оксидилендифосфоновой кислоты позволит не только эффективно извлекать скандий с поверхности ТВЭКС-С/ТВЭКС-У (99 %), но и значительно снизить стоимость процесса и повысить его экологичность.

Применение в качестве щелочного-нейтрализующего реагента бруситсодержащих отходов позволит получать высококонцентрированные магниенасыщенные растворы, которые после сушки могут быть использованы в различных отраслях промышленности.

Осадки процесса нейтрализации могут быть использованы для производства инновационных комплексных титансодержащих коагулянтов, железосодержащего сырья или возвращены на стадию вскрытия для снижения расхода фторидов.

Описанная в рамках работы комплексная система переработки диопсида позволит сделать шаг к реализации концепции Zero Waste и экономики замкнутого цикла, а также восполнить потребности РФ в стратегическом скандиевом сырье [23, 24].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rare earth elements recovery from primary and secondary resources using flotation: a systematic review / P. Julapong, A. Numprasanthai, L. Tangwattananukul, O. Juntarasakul, P. Srichonphaisarn, K. Aikawa, I. Park, M. Ito, C.B. Tabelin, T. Phengsaart // *Appl. Sci.* – 2023. – Vol. 13. – № 8364. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13148364>
2. Sager M., Wiche O. Rare Earth Elements (REE): origins, dispersion, and environmental implications – a comprehensive review // *Environments.* – 2024. – Vol. 11. – № 24. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments11020024>
3. Balaram V. Potential future alternative resources for rare earth elements: opportunities and challenges // *Minerals.* – 2023. – Vol. 13. – № 3. – P. 425.
4. Process evaluation of scandium production and its environmental impact / A. Ghosh, S. Dhiman, A. Gupta, R. Jain // *Environments.* – 2023. – Vol. 10. – № 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments10010008>
5. Research on high-pressure hydrochloric acid leaching of scandium, aluminum and other valuable components from the non-magnetic tailings obtained from red mud after iron removal / D. Zinoveev, P. Grudinsky, E. Zhiltsova, D. Grigoreva, A. Volkov, V. Dyubanov, A. Petelin // *Metals.* – 2021. – Vol. 11. – № 469. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11030469>
6. Разработка комплексной технологии выщелачивания редкоземельных металлов из золотшлаков и проблема концентрирования растворов этих металлов / Б.С. Ксенофонов, А.С. Козодаев, Р.А. Таранов, М.С. Виноградов, А.А. Ворopaева, Е.В. Сеник // *Современные наукоемкие технологии.* – 2016. – № 3-1. – С. 44–49.
7. Obtaining scandium concentrate by liquid extraction from hydrolytic sulphuric acid effluents from titanium dioxide production / I.D. Akimova, G.M. Chumakova, T.V. Molchanova, V.V. Golovko // *Non-ferrous metals.* – 2017. – Vol. 3. – P. 63–68

8. Features of scandium extraction from hydrolysis waste streams of titanium production / A.S. Nemtsev, A.S. Sibilev, A.V. Smirnov, A.V. Nechaev, S.V. Shestakov // *Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. – 2018. – Vol. 9. – Iss. (2-1). – P. 332–336.
9. Extraction of scandium from scandium-rich material derived from bauxite ore residues / G. Li, Q. Ye, B. Deng, J. Luo, M. Rao, Z. Peng, T. Jiang // *Hydrometallurgy*. – 2018. – Vol. 176. – P. 62–68.
10. Zhang N., Li H.-X., Liu X.-M. Recovery of scandium from bauxite residue – red mud: a review // *Rare Metals*. – 2016. – Vol. 35. – Iss. 12. – P. 887–900.
11. Use of machining to increase the recovery of scandium from refractory silicate raw material / S.I. Stepanov, Kh. P'ei, A.V. Boyarintsev, V.G. Giganov, A.M. Chekmarev, M.M. Aung // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2018. – Vol. 52. – Iss. 5. – P. 973–977.
12. Deactivation of the scandium concentrate recovered from uranium leach liquors / V.N. Rychkov, V.S. Semenishchev, M.A. Mashkovtsev, E.V. Kirillov, S.V. Kirillov, G.M. Bunkov, M.S. Botalov // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2016. – Vol. 310. – Iss. 3. – P. 1247–1253.
13. Study of scandium and thorium sorption from uranium leach liquors / A.L. Smirnov, S.M. Titova, V.N. Rychkov, G.M. Bunkov, V.S. Semenishchev, E.V. Kirillov, I.A. Svirsky // *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2017. – Vol. 312. – Iss. 2. – P. 277–283.
14. Recovery of scandium by crystallization techniques / E.M. Peters, Ş. Kaya, C. Dittrich, K. Forsberg // *Journal of Sustainable Metallurgy*. – 2019. – Vol. 5. – Iss. 1. – P. 48–56.
15. Extraction of scandium from sulfuric acid solutions with mixtures of D2EHPA +MTOA sulfate (toa) / D.O. Varlamova, P. Hein, M.A. Maung, S. Zhuo, A.V. Boyarintsev, S.I. Stepanov // *Advances in chemistry and chemical technology, USA*. – 2013. – Vol. 27. – Iss. 6 (146). – P. 7–11.
16. Chernoburova O., Chagnes A. The future of scandium recovery from wastes // *Mater. Proc.* – 2021. – Vol. 5. – № 55. DOI: <https://doi.org/10.3390/materproc2021005055>
17. Кузин Е.Н. Применение метода атомно-эмиссионной спектроскопии с СВЧ (магнитной) плазмой в процессах идентификации химического состава отходов сталеплавильного производства // *Черные металлы*. – 2022. – № 10. – С. 79–82. DOI: 10.17580/chm.2022.10.13
18. Кучумов В.А., Шумкин С.С. Анализ химического состава исходного сплава при производстве постоянных магнитов из сплавов системы Sm-Co // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. – 2017. – Т. 23. – № 1. – С. 219–225.
19. Нейтрализация сернокислых растворов при комплексной переработке диопсид содержащих отходов обогащения / Е.Н. Кузин, Н.Е. Кручинина, С.С. Галактионов, А.Н. Краснощеков // *Обогащение руд*. – 2019. – № 4. – С. 38–43. DOI: 10.17580/or.2019.04.07
20. Vasilenko T.A., Koltun A.A. Chemical aspects of the obtaining of iron-containing coagulant-flocculant from electric steel melting slag for wastewater treatment // *Solid State Phenomena*. – 2017. – Vol. 265. – P. 403–409.
21. Kuzin E.N., Kruchinina N.E. Titanium-containing coagulants for foundry wastewater treatment // *CIS Iron and Steel Review*. – 2020. – Vol. 20. – № 2. – P. 66–69. DOI: 10.17580/cisr.2020.02.14
22. Development and design of a closed water use cycle / J.M. Averina, G.E. Kaliakina, D.Y. Zhukov, A.Y. Kurbatov, V.S. Shumova // *19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2019)*. – Bulgaria, 2019. – Vol. 19 (3.1). – P. 145–152. DOI: 10.5593/sgem2019/3.1/S12.019
23. Towards a green industry through cleaner production development / V.H. de Mello Santos, T.L.R. Campos, M. Espuny et al. // *Environmental Science and Pollution Research (ESPR)*. – 2022. – Vol. 29. – P. 349–370. DOI: 10.1007/s11356-021-16615-2.
24. Dregulo A. Khodachek, A. Waste management reform in regions of the Russian Federation: implementation issues on the way to sustainable development // *Geography, environment, sustainability*. – 2022. – Vol. 15 (1). – P. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-078>

Информация об авторах

Александра Дмитриевна Зайцева, аспирант кафедры промышленной экологии, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Россия, 125047, г. Москва, Миусская площадь, 9, стр. 1. zaicevaaleksandra95@gmail.com

Евгений Николаевич Кузин, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной экологии, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Россия, 125047, г. Москва, Миусская площадь, 9, стр. 1; Kuzin.e.n@muctr.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2579-3900>

Наталья Евгеньевна Кручинина, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой промышленной экологии, Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева, Россия, 125047, г. Москва, Миусская площадь, 9, стр. 1; kruchinina.n.e@muctr.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7597-1993>

Сергей Сергеевич Галактионов, научный консультант, АО «Леоли Кэпитал Групп», Россия, 121165, г. Москва, ул. Дунаевского, 4. Sergey.Galaktionov@leolicg.com; <https://orcid.org/0009-0008-9840-4586>

Александр Николаевич Краснощеков, научный консультант, АО «Леоли Кэпитал Групп», Россия, 121165, г. Москва, ул. Дунаевского, 4. a.krasnoshekov@promtech-tula.com; <https://orcid.org/0009-0000-8087-3845>

Поступила в редакцию: 24.06.2024

Поступила после рецензирования: 01.11.2024

Принята к публикации: 21.04.2025

REFERENCES

1. Julapong P., Numprasanthai A., Tangwattananukul L., Juntarasakul O., Srichonphaisarn P., Aikawa K., Park I., Ito M., Tabelin C.B., Phengsaart T. Rare earth elements recovery from primary and secondary resources using flotation: a systematic review. *Appl. Sci.*, 2023, vol. 13, no. 8364. DOI: <https://doi.org/10.3390/app13148364>
2. Sager M., Wiche O., Rare Earth Elements (REE): origins, dispersion, and environmental implications – a comprehensive review. *Environments*, 2024, vol. 11, no. 24. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments11020024>
3. Balaram V. Potential future alternative resources for rare earth elements: opportunities and challenges. *Minerals*, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 425.
4. Ghosh A., Dhiman S., Gupta A., Jain R. Process evaluation of scandium production and its environmental impact. *Environments*, 2023, vol. 10, no. 8. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments10010008>
5. Zinoveev D., Grudinsky P., Zhiltsova E., Grigoreva D., Volkov A., Dyubanov V., Petelin A. Research on high-pressure hydrochloric acid leaching of scandium, aluminum and other valuable components from the non-magnetic tailings obtained from red mud after iron removal. *Metals*, 2021, vol. 11, no. 469. DOI: <https://doi.org/10.3390/met11030469>
6. Ksenofontov B.S., Kozodaev A.S., Taranov R.A., Vinogradov M.S., Voropaeva A.A., Senik E.V. Development of an integrated technology for leaching rare earth metals from ash and slag and the problem of concentrating solutions of these metals. *Modern high technology*, 2016, no. 3-1, pp. 44–49. (In Russ.)
7. Akimova I.D., Chumakova G.M., Molchanova T.V., Golovko V.V. Obtaining scandium concentrate by liquid extraction from hydrolytic sulphuric acid effluents from titanium dioxide production. *Non-ferrous metals*, 2017, vol. 3, pp. 63–68.
8. Nemtsev A.S., Sibilev A.S., Smirnov A.V., Nechaev A.V., Shestakov S.V. Features of scandium extraction from hydrolysis waste streams of titanium production. *Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2018. Vol. 9, Iss. (2-1), pp. 332–336.
9. Li G., Ye Q., Deng B., Luo J., Rao M., Peng Z., Jiang T. Extraction of scandium from scandium-rich material derived from bauxite ore residues. *Hydrometallurgy*, 2018, vol. 176, pp. 62–68.
10. Zhang N., Li H.-X., Liu X.-M. Recovery of scandium from bauxite residue – red mud: a review. *Rare Metals*, 2016, vol. 35, Iss. 12, pp. 887–900.
11. Stepanov S.I., P'ei Kh., Boyarintsev A.V., Giganov V.G., Chekmarev A.M., Aung M.M. Use of machining to increase the recovery of scandium from refractory silicate raw material. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2018, vol. 52, Iss. 5, pp. 973–977.
12. 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. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2016, vol. 310, Iss. 3, pp. 1247–1253.
13. Smirnov A.L., Titova S.M., Rychkov V.N., Bunkov G.M., Semenishchev V.S., Kirillov E.V., Svirsky I.A. Study of scandium and thorium sorption from uranium leach liquors. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2017, vol. 312, Iss. 2, pp. 277–283.
14. Peters E.M., Kaya Ş., Dittrich C., Forsberg K. Recovery of scandium by crystallization techniques. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2019, vol. 5, Iss. 1, pp. 48–56.
15. Varlamova D.O., Hein P., Maung M.A., Zhuo S., Boyarintsev A.V., Stepanov S.I. Extraction of scandium from sulfuric acid solutions with mixtures of D2EHPA +MTOA sulfate (toa). *Advances in chemistry and chemical technology*, USA, 2013, vol. 27, Iss. 6 (146), pp. 7–11.
16. Chernoburova O., Chagnes A. The future of scandium recovery from wastes. *Mater. Proc.*, 2021, vol. 5, no. 55. DOI: <https://doi.org/10.3390/materproc2021005055>
17. Kuzin E.N. Application of the method of atomic emission spectroscopy with microwave (magnetic) plasma in the processes of identifying the chemical composition of steelmaking waste. *Black metals*, 2022, no. 10. pp. 79–82. (In Russ.) DOI: 10.17580/chm.2022.10.13
18. Kuchumov V.A., Shumkin S.S. Analysis of the chemical composition of the initial alloy in the production of permanent magnets from alloys of the Sm-Co system. *Scientific and Technical Journal of St. Petersburg State Polytechnic University*, 2017, vol. 23, no. 1, pp. 219–225. (In Russ.)
19. Kuzin E.N., Kruchinina N.E., Galaktionov S.S., Krasnoshchekov A.N. Neutralization of sulfuric acid solutions during complex processing of diopside-containing enrichment waste. *Ore Enrichment*, 2019, no. 4, pp. 38–43. (In Russ.) DOI: 10.17580/or.2019.04.07
20. Vasilenko T.A., Koltun A.A. Chemical aspects of the obtaining of iron-containing coagulant-flocculant from electric steel melting slag for wastewater treatment. *Solid State Phenomena*, 2017, vol. 265, pp. 403–409.
21. Kuzin E.N., Kruchinina N.E. Titanium-containing coagulants for foundry wastewater treatment. *CIS Iron and Steel Review*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 66–69 DOI: 10.17580/cisr.2020.02.14
22. Averina J.M., Kaliakina G.E., Zhukov D.Y., Kurbatov A.Y., Shumova V.S. Development and design of a closed water use cycle. *19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2019)*. Bulgaria, 2019. Vol. 19 (3.1.), pp. 145–152. DOI: 10.5593/sgem2019/3.1/S12.019
23. De Mello Santos V.H., Campos T.L.R., Espuny M. Towards a green industry through cleaner production development. *Environmental Science and Pollution Research (ESPR)*, 2022, vol. 29, pp. 349–370. DOI: 10.1007/s11356-021-16615-2.
24. Dregulo A., Khodachek A. Waste management reform in regions of the Russian Federation: implementation issues on the way to sustainable development. *Geography, environment, sustainability*, 2022, vol. 15 (1), pp. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-078>

Information about the authors

Alexandra D. Zaitseva, Postgraduate Student, D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 9, bld. 1, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation. zaicevaaleksandra95@gmail.com

Evgenii N. Kuzin, Cand. Sc., Associate Professor, D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 9, bld. 1, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation; Kuzin.e.n@muctr.ru. <https://orcid.org/0000-0003-2579-3900>

Natalia E. Kruchinina, Dr. Sc., Professor, Head of the Industrial Ecology Department, D.I. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, 9, bld. 1, Miusskaya square, Moscow, 125047, Russian Federation. kruchinina.n.e@muctr.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7597-1993>

Sergey S. Galaktionov, Scientific Consultant, LTD "Leoli Capital Group", 4, Dunaevsky street, Moscow, 121165, Russian Federation. Sergey.Galaktionov@leolicg.com; <https://orcid.org/0009-0008-9840-4586>

Alexander N. Krasnoshchekov, Scientific Consultant, LTD "Leoli Capital Group", 4, Dunaevsky street, Moscow, 121165, Russian Federation. a.krasnoshekov@promtech-tula.com; <https://orcid.org/0009-0008-9840-4586>

Received: 24.06.2024

Revised: 01.11.2024

Accepted: 21.04.2025