

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 330.15, 553.3.072

ББК 26.34, 33.3

<https://doi.org/10.21443/3034-1434-2025-3-4-47-56>



Перспективы глубокой переработки бадделеитового концентрата в контексте мирового рынка скандия

Калашников А.О.¹, Данилин К.П.²✉, Дядик В.В.²

¹ Филиал ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет»
в г. Апатиты, Апатиты, Россия

² Институт экономических проблем им. Г.П. Лузина ФГБНУ ФИЦ
«Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты,
Россия

✉ k.danilin@ksc.ru

Аннотация. В статье представлен комплексный анализ перспектив глубокой переработки бадделеитового концентрата Ковдорского месторождения в контексте развития мирового рынка скандия. Исследование выявляет парадоксальную ситуацию в российской редкометалльной отрасли: при наличии значительных ресурсов скандия в различных типах месторождений страна остается поставщиком сырья на мировой рынок при ограниченном внутреннем производстве. На основе актуальных рыночных данных проведена стоимостная оценка полезных компонентов бадделеитового концентрата, показавшая, что потенциальная выручка от переработки одной тонны сырья может достигать 1,62 млн долларов. Установлено, что ключевым фактором экономической эффективности является глубина переработки, определяющая разрыв в стоимости конечной продукции более чем в 1 млн долларов на тонну концентрата. Обоснована стратегическая целесообразность создания в России замкнутых технологических циклов переработки бадделеитового концентрата, что соответствует приоритетам развития Арктической зоны РФ и будет способствовать обеспечению технологического суверенитета страны в области редких и редкоземельных металлов.

Ключевые слова: скандий, бадделеитовый концентрат, Ковдорское месторождение, редкие металлы, глубокая переработка, минерально-сырьевая база, стоимостная оценка, Арктическая зона РФ

Конфликт интересов: авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Калашников А.О., Данилин К.П., Дядик В.В. Перспективы глубокой переработки бадделеитового концентрата в контексте мирового рынка скандия. Арктика и инновации. Арктика и инновации. 2025;3(4):47–56. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2025-3-4-47-56>

Prospects for deep processing of baddeleyite concentrate in the context of global scandium market

Andrey O. Kalashnikov¹, Konstantin P. Danilin²✉,
Vladimir V. Dyadik²

¹ Murmansk Arctic University, Apatity branch, Apatity, Russia

² Luzin Institute for Economic Studies of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

✉ k.danilin@ksc.ru

Abstract. This article presents a comprehensive analysis of the prospects for deep processing of baddeleyite concentrate from the Kovdor deposit (Russia), which is of importance in the context of the growing global scandium market. At present, the Russian rare metals industry is characterized by a paradox. On the one hand, the country enjoys significant scandium resources contained in various types of deposits and remains a supplier of raw materials to the global market. On the other hand, domestic production of scandium is limited. The conducted cost assessment of valuable components in baddeleyite concentrate based on current market data showed that the potential revenue from processing one ton of raw material could reach 1.62 million US dollars. Processing depth was found to be the key factor of economic efficiency, which creates a gap in the value of the final product of over one million US dollars per ton of concentrate. The strategic feasibility of establishing closed-loop technological cycles for processing baddeleyite concentrate in Russia is substantiated. This aligns with the development priorities of the Russian Arctic Zone in terms of ensuring technological sovereignty in the field of rare and rare-earth metals.

Keywords: scandium, baddeleyite concentrate, Kovdor deposit, rare metals, deep processing, mineral resource, cost assessment, Russian Arctic Zone

Conflict of Interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Kalashnikov A.O., Danilin K.P., Dyadik V.V. Prospects for deep processing of baddeleyite concentrate in the context of global scandium market. *Arctic and Innovation*. 2025;3(4):47–56. <https://doi.org/10.21443/3034-1434-2025-3-4-47-56>

Введение

Скандий представляет собой стратегически важный редкий металл с уникальными свойствами, находящий применение в авиакосмической промышленности, автомобилестроении, ядерной энергетике, оптике и других высокотехнологичных отраслях. Скандий — мягкий серебристый металл с высокой температурой плавления (1538 °C). В природе существует только один стабильный изотоп, ⁴⁵Sc, и он всегда находится в степени окисления +3.

Россия обладает колоссальной минерально-сырьевой базой скандия, заключенной в рудах различных типов месторождений, при этом заметная часть мирового скандия извлекается за рубежом из экспортируемого российского сырья, в то время как вну-

треннее производство остается на довольно низком уровне. Преодоление этого сырьевого парадокса и создание замкнутого высокотехнологичного цикла от добычи сырья до выпуска конечной продукции является одной из ключевых задач в области стратегического развития редкометалльной отрасли России.

Анализ рынка скандия: мировые тенденции и российские реалии

Потребление скандия в мире в пересчете на оксид (Sc₂O₃) в 2024 году оценивается в диапазоне от 25 до 30 тонн в год [1, 2]. Российский сегмент этого рынка, по экспертным оценкам, составляет около 4 тонн Sc₂O₃ в год. Основная сфера применения на внутреннем рынке — создание

алюминиево-скандиевых сплавов для нужд аэрокосмической и оборонной промышленности. Крупнейшим отечественным потребителем является, в частности, ООО «Орион-Спецсплав-Гатчина».

Стоимостные показатели рынка находятся в значительном диапазоне. Так, мировой рынок скандия оценивается от 350 до 700 млн долларов. Российский рынок, соответственно, можно приблизительно оценить в 2 млрд рублей в год. Ценовая конъюнктура по состоянию на середину 2025 года характеризуется следующими значениями: оксид скандия чистотой 99,99 % оценивается в 642,22 долл./кг (EXW Китай), в то время как стоимость металлического скандия аналогичной чистоты достигает 3177,17 долл./кг [3].

Современная конъюнктура мирового рынка скандия характеризуется рядом устойчивых тенденций, обусловленных как ростом спроса со стороны высокотехнологичных отраслей, так и трансформацией производственно-сырьевой базы.

Во-первых, наблюдается устойчивый рост объемов рынка и его стоимостных показателей. По состоянию на 2024 год нижняя оценка мирового рынка скандия составляет 350 млн долларов, и к 2030 году прогнозируется её рост до 490 млн долларов [2, 3]. Данная динамика стимулирует инвестиции в разведку новых месторождений и расширение производственных мощностей.

Во-вторых, происходит стратегическое расширение сырьевой базы за счет перехода к комплексной переработке минерального и техногенного сырья. Традиционная добыча скандия из редких собственных минералов (таких, как тортвейтит) в последние 30 лет уступила место попутному извлечению из отходов основных производств. Наиболее перспективными источниками становятся «красные шламы» алюминиевой промышленности (проекты «РУСАЛа» в России и др.) [4–8], а также попутное извлечение при добыче титана и урановых руд [9–12]. Этот тренд не только повышает экономическую рентабельность за счет снижения удельных затрат, но и вносит вклад в решение экологических проблем, обеспечивая при этом стабильность цепочек поставок.

В-третьих, значительное влияние на отрасль оказывают технологические инновации и це-

ленаправленные государственные инвестиции. Разработка и внедрение эффективных гидрометаллургических и экстракционных технологий позволяют снизить себестоимость конечной продукции и повысить ее чистоту. Ярким примером является технология получения высокочистого (99,99 %) металлического скандия, разработанная предприятиями Росатома [13]. Одновременно с этим правительства ведущих стран (США, государства ЕС) включают скандий в перечни критически важных полезных ископаемых, что создает основу для мер государственной поддержки и стимулирует создание национальных производственных цепочек [14].

Наконец, отчетливой тенденцией является географическая диверсификация источников поставок. Исторически на рынке доминировал Китай, однако в последнее время активно развиваются проекты в других регионах, включая Австралию (Scandium International Mining Corp.), Россию («РУСАЛ», «Росатом»), Канаду (Scandium Canada Ltd.) и страны СНГ [1, 2, 15]. Эта диверсификация способствует снижению стратегических рисков, связанных с концентрацией производства в одном регионе, и усиливает конкурентную среду на глобальном рынке.

Таким образом, мировой рынок скандия эволюционирует от модели, зависимой от ограниченного числа источников сырья, к более диверсифицированной, технологичной и устойчивой структуре, что создает благоприятные условия для его долгосрочного развития.

Обобщенно тренды изменения конъюнктуры рынка скандия и прогноз их влияния на рынок в среднесрочной перспективе представлены в таблице 1.

Производственная база скандия в России на текущий момент ограничена. Единственным официально заявленным производителем металлического скандия и его оксида является предприятие Росатома — АО «Далур», мощности которого позволяют производить 1,5–2 тонны продукции в год. Однако, по оценкам экспертов отрасли, реальный объем выпуска не превышает нескольких сотен килограммов. Значительным потенциалом обладает проект «РУСАЛа», планирующий к концу 2025 года запуск опытной установки по производству 1,5 тонны оксида скандия в год. Таким образом, существует

Таблица 1. Основные мировые тенденции в добыче и производстве скандия
Table 1. Main trends in scandium mining and production

Тренд	Проявление и примеры	Среднесрочный прогноз влияния на рынок
Устойчивый рост рынка	Мировой рынок скандия оценивается в 350 млн \$ (2024 г.), прогнозируется рост до 490+ млн \$ к 2030 году	Создает стимулы для инвестиций в новые проекты и расширение мощностей
Расширение сырьевой базы и вовлечение техногенных месторождений	Извлечение отходов производства (красных шламов) и попутное извлечение при добыче других видов сырья (титана и урана)	Повышает рентабельность текущих добывающих производств, решает экологические проблемы, стабилизирует цепочку поставок
Технологические инновации и стратегические инвестиции	Разрабатываются технологии получения высокочистого металлического скандия. Скандий включается в перечни критических металлов	Снижает себестоимость, улучшает качество продукции, стимулирует создание новых национальных производств
Географическая диверсификация поставок	Исторически доминировал Китай. Сейчас развиваются проекты в Австралии, Канаде, России и др.	Снижает риски цепочек поставок, усиливает глобальную конкуренцию, увеличивает национальный сырьевой суверенитет

Источник: составлено авторами
Source: compiled by the authors

значительный разрыв между потенциальным внутренним спросом, оцениваемым в 4 тонны, и фактическим предложением, что создает устойчивую потребность в организации новых производств.

При этом ресурсная база скандия России довольно большая. Разведаны уникальное Томторское Nb-Sc-REE месторождение на северо-западе Якутии; Кумирское Sc-U-PЗЭ месторождение (Горный Алтай); оценены запасы в хвостохранилищах бокситового производства (красные шламы); оценены запасы скандия Далматовского и Добровольного урановых месторождений, разрабатываемых методом подземного выщелачивания [2, 9, 12, 16, 17]. Кроме того, для Ковдорского бадделеит-апатит-магнетитового месторождения дана авторская оценка стоимости неизвлеченных запасов скандия [18].

Ковдорское месторождение как стратегический сырьевой источник скандия в Арктике

Ковдорское месторождение (Мурманская область) представляет собой уникальный комплексный рудный объект, содержащий запасы магнетита, апатита, бадделеита и других полезных ископаемых [19, 20]. Бадделеит (ZrO_2) является основным циркониевым минералом Ковдорского месторождения и одновременно главным концентратором скандия.

Бадделеитовый концентрат, производимый АО «Ковдорский ГОК», представляет собой мелкодисперсный порошок черного цвета. Помимо основного компонента — оксида циркония (ZrO_2), содержание которого составляет 94–98 %, концентрат содержит целый спектр ценных попутных элементов: гафний, ниобий, тантал, скандий.

В таблице 2 приведена стоимостная оценка основных ценных компонентов, присутствующих в одной тонне бадделеитового концентрата Ковдорского месторождения. Для каждого элемента указаны различные формы товарной продукции, их рыночная стоимость (в USD за килограмм), расчетное содержание в концентрате (в процентах) и итоговая стоимость, которую можно получить из одной тонны сырья для каждой товарной формы.

Анализ таблицы позволяет выделить три ключевые группы компонентов, определяющие его высокую экономическую ценность.

1. Ключевым драйвером стоимости выступает цирконий, который в форме губки $Zr + Hf$ 99,4 % вносит наибольший вклад в общую стоимость концентрата — от 412 607 до 1 441 019 USD/т. Его доминирующее положение обусловлено исключительно высоким содержанием в бадделеите (около 94–98 % в пересчете на оксид) в сочетании со значительной стоимостью высококачественных товарных форм.

Таблица 2. Стоимостная оценка полезных компонентов в 1 тонне бадделеитового концентрата Ковдорского месторождения

Table 2. Cost estimate of useful components in 1 ton of baddeleyite concentrate from the Kovdor deposit

Элемент	Соединение	USD/кг	Содержание в бадделеите, %	USD в одной тонне бадделеитового концентрата
Скандий	Sc ₂ O ₃	642	0,078	50 076
	Sc металл 99,99 %	3 177	0,029	90 697
	Sc металл 99,999 %	5 123	0,029	146 251
Цирконий	Плавленный Zr(Hf)O ₂ 98,5 %	4	94–98	412 607
	Zr + Hf 99,4 % губка	20	71	1 441 019
Ниобий	Nb ₂ O ₅ 99,5 %	53	0,253	13 487
	Nb ₂ O ₅ 99,99 %	58	0,253	14 565
Тантал	Ta металл 99,95 %	344	0,046	15 765
	Ta ₂ O ₅ 99,5 %	220	0,112	24 631
	Ta ₂ O ₅ 99,99 %	256	0,112	28 694
Сумма по минимальной стоимости товарных продуктов				500 801
Сумма по максимальной стоимости товарных продуктов				1 617 601

Источник: составлено авторами по собственным данным, данным из [18. 20] и аналитического агентства Asianmetal (Asianmetal.com)
Source: compiled by the authors based on their own data, data from [18. 20], and the Asianmetal analytical agency (Asianmetal.com)

2. Особое значение как высокомаржинальный компонент имеет скандий. Несмотря на низкое содержание в концентрате (0,078 % в пересчете на оксид), он обеспечивает от 50 076 до 146 251 USD/т стоимости. Крайне высокая удельная стоимость товарных форм скандия, особенно металла чистотой 99,999 % (5123 USD/кг), делает его стратегически важным компонентом. Именно ради его извлечения может быть экономически оправдана организация сложного гидрометаллургического передела, требующего значительных инвестиций и передовых технологий.

3. Существенный вклад в общую стоимость вносят попутные ценные компоненты — ниобий и тантал. Ниобий добавляет к стоимости 13,5–14,5 тыс. USD/т, а тантал вносит дополнительно 15,8–28,7 тыс. USD/т. Совокупный вклад этих металлов является существенным фактором, дополнительно повышающим рентабельность комплексной переработки сырья и укрепляющим экономическую целесообразность проекта в целом.

Суммарная потенциальная стоимость одной тонны бадделеитового концентрата варьируется в значительном диапазоне, определяемом глубиной передела и качеством конечных товарных продуктов. Минимальная оценка в 0,5 млн USD/т складывается при выпуске базовых продуктов: оксида скандия,

плавленного диоксида циркония, оксида ниобия и металлического тантала. В то же время максимальная оценка в 1,62 млн USD/т достигается при ориентации на производство высококачественных продуктов, а именно высокочистого металлического скандия, циркониевой губки, а также высокочистых оксидов ниобия и тантала. Этот разрыв в миллион долларов на тонну сырья наглядно демонстрирует критическую важность развития передовых технологий глубокой переработки для максимизации экономического эффекта от освоения сырьевой базы.

Обсуждение

Проведенный анализ однозначно свидетельствует о стратегической целесообразности организации глубокой переработки бадделеитового концентрата Ковдорского месторождения. Потенциальная валовая выручка, достигающая 1,62 млн долларов на тонну сырья, трансформирует традиционное восприятие бадделеита как циркониевого сырья в стратегический многокомпонентный ресурс высшего порядка. Однако реализация этого потенциала требует преодоления ряда технологических и экономических вызовов.

Ключевым выводом исследования является необходимость реализации комплексного технологического подхода, создающего

возможность селективного извлечения каждого полезного компонента. Как демонстрирует стоимостный анализ, ориентация исключительно на цирконий или скандий приведет к безвозвратной потере до 70 % потенциальной стоимости, заключенной в попутных компонентах. Это обуславливает потребность в создании многостадийных гидрометаллургических и ионообменных схем, обеспечивающих селективное извлечение всех ценных элементов.

Особого внимания заслуживает выявленная сильная зависимость прогнозной выручки от глубины передела и качества конечной продукции. Разрыв в 1,1 млн долларов за тонну между минимальной и максимальной оценками потенциальной стоимости подчеркивает критическую важность развития в России технологий глубокой переработки, включая производство циркониевой губки и высокочистого металлического скандия. Отсутствие таких технологий на промышленном уровне будет означать фактическое субсидирование зарубежных переработчиков, получающих добавленную стоимость от российского сырья.

В контексте мировых тенденций развития рынка скандия российские проекты по комплексной переработке бадделеита соответствуют ключевому тренду диверсификации сырьевой базы и источников поставок. Создание производства скандия из бадделеитового концентрата позволит России не только удовлетворить внутреннюю потребность в этом стратегическом металле, но и занять значимую долю на мировом рынке.

Реализация проекта переработки бадделеитового концентрата соответствует стратегическим приоритетам развития Арктической зоны РФ, предусматривающим создание высокотехнологичных производств на основе комплексного использования минеральных ресурсов [21]. Успешная реализация проекта потребует консолидации усилий научно-исследовательских организаций, промышленных предприятий и государственных институтов развития. Это придаст проекту комплексной переработки бадделеита федеральное значение в контексте обеспечения политики импортозамещения и технологического суверенитета Российской Федерации.

Перспективы дальнейших исследований видятся в следующих направлениях:

- 1) разработка и оптимизация технологических схем селективного извлечения скандия из бадделеитового концентрата;
- 2) проведение детального ТЭО создания промышленного производства с учетом капитальных и операционных затрат;
- 3) исследование рынков сбыта для всех компонентов комплексной переработки;
- 4) оценка экологической эффективности предлагаемых технологических решений.

Таким образом, глубокая переработка бадделеитового концентрата Ковдорского месторождения представляет собой экономически обоснованный и стратегически важный проект, способный обеспечить технологический суверенитет России в области редких и редкоземельных металлов.

Выводы

1. Ковдорское месторождение представляет собой уникальный комплексный ресурс, где бадделеитовый концентрат содержит не только цирконий, но и стратегически важные примеси гафния, скандия, ниобия и тантала. Стоимостная оценка показывает, что потенциальная выручка от переработки одной тонны концентрата может достигать 1,62 млн долларов.
2. Ключевым фактором экономической эффективности является глубина переработки сырья. Разрыв между минимальной (0,5 млн USD/т) и максимальной (1,62 млн USD/т) оценками стоимости демонстрирует важность развития технологий глубокой переработки, позволяющих производить высококачественные товарные формы металлов.
3. Реализация проекта комплексной переработки бадделеитового концентрата соответствует стратегическим приоритетам развития Арктической зоны РФ и будет способствовать обеспечению технологического суверенитета России в области редких и редкоземельных металлов.
4. Для практической реализации проекта необходима консолидация усилий научно-

исследовательских организаций, промышленных предприятий и государственных институтов развития, а также проведение дополнительных исследований в области технологий селективного извлечения, экономического обоснования и экологической оценки.

Перспективы развития производства скандия в России связаны с созданием замкнутых технологических циклов — от добычи сырья до выпуска конечной продукции, что позволит не только удовлетворить внутренние потребности, но и занять значимую долю на мировом рынке стратегических металлов.

Литература

1. U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2022. Report. Reston, Virginia; 2022. <https://doi.org/10.3133/mcs2022>
2. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2023 году [интернет]. Москва; 2024. Режим доступа: https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvenny_doklad_o_sostoyani_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/
3. Asian Metal [internet]. Available at: <https://www.asianmetal.com/>.
4. Liu Y., Naidu R. Hidden values in bauxite residue (red mud): Recovery of metals. Waste management. 2014;34(12):2662–2673. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.003>
5. Mudd G.M., Jowitt S.M., Werner T.T. The world's by-product and critical metal resources part I: Uncertainties, current reporting practices, implications and grounds for optimism. Ore Geology Reviews. 2016;86:924–938. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.05.001>
6. Ochsenku-Petropoulou M.T., Hatzilyberis K.S., Mendrinou L.N., Salmas C.E. Pilot-Plant Investigation of the Leaching Process for the Recovery of Scandium from Red Mud. Industrial & Engineering Chemistry Research. 2002;41(23):5794–5801. <https://doi.org/10.1021/ie011047b>
7. Wang W., Pranolo Y., Cheng C.Y. Recovery of scandium from synthetic red mud leach solutions by solvent extraction with D2EHPA. Separation and Purification Technology. 2013;108:96–102. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.02.001>
8. Zhou H., Li D., Tian Y., Chen Y. Extraction of scandium from red mud by modified activated carbon and kinetics study. Rare Metals. 2008;27(3):223–227. [https://doi.org/10.1016/S1001-0521\(08\)60119-9](https://doi.org/10.1016/S1001-0521(08)60119-9)
9. Быховский Л.З., Архангельская В.В., Тижунов Л.П., Ануфриева С.И. Перспективы освоения минерально-сырьевой базы и развития производства скандия в России и других странах СНГ. Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2007;(5):27–32.
10. Zhu Z., Pranolo Y., Cheng C.Y. Separation of uranium and thorium from rare earths for rare earth production — A review. Minerals Engineering. 2015;77:185–196. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.03.012>
11. Wang W., Pranolo Y., Cheng C.Y. Metallurgical processes for scandium recovery from various resources: A review. Hydrometallurgy. 2011;108(1–2):100–108. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.03.001>
12. Williams-Jones A.E., Vasyukova O. V. The Economic Geology of Scandium, the Runt of the Rare Earth Element Litter. Economic Geology. 2018;113(4):973–988. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4579>
13. Пироженко К.Ю. Сорбционное извлечение скандия из возвратных растворов скважинного подземного выщелачивания урана: дис. ... канд. техн. наук. Москва: Московский институт стали и сплавов; 2016.
14. Chakhmouradian A.R., Smith M.P., Kynicky J. From “strategic” tungsten to “green” neodymium: A century of critical metals at a glance. Ore Geology Reviews. 2015;64:455–458. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.06.008>
15. Scandium Canada Ltd. Crater Lake [internet]. Available at: <https://scandium-canada.com/crater-lake/> (accessed 12 November 2025).
16. Толстов А.В., Гунин А.П. Комплексная оценка Томторского месторождения. Вестник ВГУ. Серия Геология. 2001;(11):144–160.

17. Гусев А.И., Гусев Н.И. Магматизм и оруденение Кумирского рудного поля, Горный Алтай. Руды и металлы. 2009;(6):21–28.
18. Kalashnikov A.O., Yakovenchuk V.N., Pakhomovsky Y.A., Bazai A.V., Sokharev V.A., Konopleva N.G., Mikhailova J.A., Goryainov P.M., Ivanyuk G.Y. Scandium of the Kovdor baddeleyite–apatite–magnetite deposit (Murmansk Region, Russia): Mineralogy, spatial distribution, and potential resource. *Ore Geology Reviews*. 2016;72(Part 1):532–537. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.08.017>
19. Афанасьев Б.В. Минеральные ресурсы щелочно-ультраосновных массивов Кольского полуострова. Санкт-Петербург: Роза ветров; 2011.
20. Ivanyuk G.Y., Kalashnikov A.O., Pakhomovsky Y.A., Mikhailova J.A., Yakovenchuk V.N., Konopleva N.G., Sokharev V.A., Bazai A.V., Goryainov P.M. Economic minerals of the Kovdor baddeleyite–apatite–magnetite deposit, Russia: mineralogy, spatial distribution and ore processing optimization. *Ore Geology Reviews*. 2016;77:279–311. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.02.008>
21. Стратегия пространственного развития Российской Федерации до 2025 года: распоряжение Правительства РФ от 13 февр. 2019 г. № 207-р [интернет]. Режим доступа: https://www.economy.gov.ru/material/file/31593409eddf606620f49806c6ece205/130219_207-p.pdf.

References

1. U.S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries 2022. Report. Reston, Virginia; 2022. <https://doi.org/10.3133/mcs2022>
2. State Report on the State and Use of Mineral Resources of the Russian Federation in 2023 [internet]. Moscow; 2024. Available at: https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvenny_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/.
3. Asian Metal [internet]. Available at: <https://www.asianmetal.com/>.
4. Liu Y., Naidu R. Hidden values in bauxite residue (red mud): Recovery of metals. *Waste management*. 2014;34(12):2662–2673. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.003>
5. Mudd G.M., Jowitt S.M., Werner T.T. The world's by-product and critical metal resources part I: Uncertainties, current reporting practices, implications and grounds for optimism. *Ore Geology Reviews*. 2016;86:924–938. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.05.001>
6. Ochsenku-Petropoulou M.T., Hatzilyberis K.S., Mendrinou L.N., Salmas C.E. Pilot-Plant Investigation of the Leaching Process for the Recovery of Scandium from Red Mud. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2002;41(23):5794–5801. <https://doi.org/10.1021/ie011047b>
7. Wang W., Pranolo Y., Cheng C.Y. Recovery of scandium from synthetic red mud leach solutions by solvent extraction with D2EHPA. *Separation and Purification Technology*. 2013;108:96–102. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.02.001>
8. Zhou H., Li D., Tian Y., Chen Y. Extraction of scandium from red mud by modified activated carbon and kinetics study. *Rare Metals*. 2008;27(3):223–227. [https://doi.org/10.1016/S1001-0521\(08\)60119-9](https://doi.org/10.1016/S1001-0521(08)60119-9)
9. Bykhovsky L.Z., Arkhangelskaya V.V., Tiganov L.P., Anufrieva S.I. Development potentialities of the scandium resource base and production in Russia and other cis countries. *Mineral Resources of Russia. Economics and Management*. 2007;(5):27–32. (In Russ.).
10. Zhu Z., Pranolo Y., Cheng C.Y. Separation of uranium and thorium from rare earths for rare earth production — A review. *Minerals Engineering*. 2015;77:185–196. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.03.012>
11. Wang W., Pranolo Y., Cheng C.Y. Metallurgical processes for scandium recovery from various resources: A review. *Hydrometallurgy*. 2011;108(1–2):100–108. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.03.001>
12. Williams-Jones A.E., Vasyukova O. V. The Economic Geology of Scandium, the Runt of the Rare Earth Element Litter. *Economic Geology*. 2018;113(4):973–988. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4579>
13. Pirozhenko K.Yu. Sorption extraction of scandium from in-situ leaching return solutions of uranium [internet]. Moscow: National University of Science and Technology MISIS; 2016. (In Russ.).
14. Chakhmouradian A.R., Smith M.P., Kynicky J. From “strategic” tungsten to “green” neodymium: A century of critical metals at a glance. *Ore Geology Reviews*. 2015;64:455–458. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.06.008>

15. Scandium Canada Ltd. Crater Lake [internet]. Available at: <https://scandium-canada.com/crater-lake/> (accessed 12 November 2025).
16. Tolstov A.V., Gunin A.P. Comprehensive evaluation of Tomtor ore deposits. Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology. 2001;(11):144–160. (In Russ.).
17. Gusev A.I., Gusev N.I. Magmatism and mineralization of the Kumir ore field, Gorny Altai. Rudy i metally = Ores and Metals. 2009;(6):21–28. (In Russ.).
18. Kalashnikov A.O., Yakovenchuk V.N., Pakhomovsky Y.A., Bazai A.V., Sokharev V.A., Konopleva N.G., Mikhailova J.A., Goryainov P.M., Ivanyuk G.Y. Scandium of the Kovdor baddeleyite–apatite–magnetite deposit (Murmansk Region, Russia): Mineralogy, spatial distribution, and potential resource. Ore Geology Reviews. 2016;72(Part 1):532–537. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.08.017>
19. Afanasyev B.V. Mineral resources of the alkaline-ultramafic massifs of the Kola Peninsula. St. Petersburg: Roza Vetrov; 2011. (In Russ.).
20. Ivanyuk G.Y., Kalashnikov A.O., Pakhomovsky Y.A., Mikhailova J.A., Yakovenchuk V.N., Konopleva N.G., Sokharev V.A., Bazai A.V., Goryainov P.M. Economic minerals of the Kovdor baddeleyite–apatite–magnetite deposit, Russia: mineralogy, spatial distribution and ore processing optimization. Ore Geology Reviews. 2016;77:279–311. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.02.008>
21. Spatial Development Strategy of the Russian Federation until 2025: Approved by the Decree of the Government of the Russian Federation No. 207-r of February 13, 2019 [internet]. Available at: Moscow: https://www.economy.gov.ru/material/file/31593409eddf60662of49806c6ece205130219_207-p.pdf. (In Russ.).

Сведения об авторах

Калашников Андрей Олегович — кандидат геолого-минералогических наук, директор учебно-научного центра «Инженерная школа АФ МАУ», ФГАОУ ВО «Мурманский арктический университет», филиал в г. Апатиты, Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, ул. Лесная, влд. 29
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6766-7174>
 SCOPUS AuthorID: 36910721300
 ResearcherID: D-1532-2018
 РИНЦ AuthorID: 178980
 SPIN-код: 7529-2797
 Тел.: +7 (921) 035-50-56
 E-mail: a.kalashnikov@ksc.ru

Данилин Константин Павлович — стажер-исследователь, Институт экономических проблем им. Г.П. Лузина ФГБН ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук», Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, ул. Ферсмана, д. 14
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1550-0588>
 SCOPUS AuthorID: 58020282100
 ResearcherID: IAM-5239-2023
 РИНЦ AuthorID: 1149979
 SPIN-код: 8781-0736
 Тел.: +7 (900) 937-99-82
 E-mail: k.danilin@ksc.ru

Дядик Владимир Владимирович — кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, Институт экономических проблем им. Г.П. Лузина ФГБН ФИЦ «Кольский научный центр Российской академии наук», Россия, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, ул. Ферсмана, д. 14

Information about the authors

Andrey O. Kalashnikov — Cand. Sci. (Geol.-Mineral.), Director of the Engineering School of the Murmansk Arctic University, Apatity Branch, Russia, 184209, Murmansk Oblast, Apatity, Lesnaya str., bldg. 29
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6766-7174>
 SCOPUS AuthorID: 36910721300
 ResearcherID: D-1532-2018
 RSCI AuthorID: 178980
 SPIN code: 7529-2797
 Tel.: +7 (921) 035-50-56
 E-mail: a.kalashnikov@ksc.ru

Konstantin P. Danilin — Research Intern, G.P. Luzin Institute of Economic Problems, Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, Russia, 184209, Murmansk Oblast, Apatity, Fersmana str., 14
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1550-0588>
 SCOPUS AuthorID: 58020282100
 ResearcherID: IAM-5239-2023
 RSCI AuthorID: 1149979
 SPIN code: 8781-0736
 Tel.: +7 (900) 937-99-82
 E-mail: k.danilin@ksc.ru

Vladimir V. Dyadik — Cand. Sci. (Economics), Senior Researcher, G.P. Luzin Institute of Economic Problems, Kola Research Center of the Russian Academy of Sciences, Russia, 184209, Murmansk Oblast, Apatity, Fersmana str., 14
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6004-9533>

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6004-9533>
SCOPUS AuthorID: 57222556400
РИНЦ AuthorID: 727025
SPIN-код: 5011-7237
Тел.: +7 921 277 03 45
E-mail: v.dyadik@ksc.ru

SCOPUS AuthorID: 57222556400
RSCI AuthorID: 727025
SPIN code: 5011-7237
Tel.: +7 921 277 03 45
E-mail: v.dyadik@ksc.ru

Вклад авторов

Калашников Андрей Олегович — концептуализация, написание статьи, редактирование.

Данилин Константин Павлович — анализ данных, исследование, написание статьи.

Дядик Владимир Владимирович — обсуждение, анализ данных, редактирование.

Author contribution statement

Andrey O. Kalashnikov — research concept, manuscript writing, editing.

Konstantin P. Danilin — data analysis, conducting research, manuscript writing.

Vladimir V. Dyadik — discussion, data analysis, manuscript revision.