

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Геология и полезные ископаемые

УДК 34.33(571.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-7-27>



Оригинальная статья

Схема создания редкометалльного кластера в Республике Саха (Якутия)

А. И. Матвеев^{✉,1,2}, А. В. Толстов^{3,4}, И. М. Петров⁵

¹Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск, Российская Федерация,

²Институт горного дела Севера СО РАН им. Н.В. Черского, г. Якутск, Российская Федерация

³Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

⁴Институт геологии и минералогии СО РАН им. В.С. Соболева, г. Новосибирск, Российская Федерация

⁵ООО «Исследовательская группа «Информайн», г. Москва, Российская Федерация

✉ andrei.mati@yandex.ru

Аннотация

Выполненными исследованиями в рамках региональных комплексных научных программ Республики Саха (Якутия) (КНИ-2) с учетом мирового и отечественного рынка редкометалльного сырья установлено, что к наиболее востребованным, помимо редких металлов и редкоземельных элементов (РМ и РЗЭ), заключенных в Томторском месторождении, относятся литий из гидроминеральных рассолов Западной Якутии и вольфрам Агылкинского месторождения. Для повышения эффективности проектов и организации в Якутии производства продукции с высокой добавленной стоимостью предлагается модель создания в РС(Я) единого редкометалльного кластера, включающего три проекта, предусматривающих: 1) извлечение лития из гидроминерального сырья (рассолы трубки «Удачная»); 2) получение РЗМ – ниобия, скандия (и, возможно, марганца) из руд Томторского месторождения; 3) получение вольфрамового концентрата из руд Агылкинского месторождения. Первые два проекта, включающих выпуск химических реагентов (каустическая сода, хлор или соляная кислота) из местных ресурсов, предполагается создать на территории Мирнинского и Оленекского районов РС(Я). Для извлечения лития предложено применение селективных сорбентов отечественного (аксионит) или китайского производства, конечной товарной продукцией является карбонат лития, который может поставляться для использования в РФ (например, ХМЗ в Красноярске) или на экспорт (в Китай). Первичная химическая обработка томторских руд с получением товарных промпродуктов: пирохлорового концентрата и обогащенного по РЗМ и скандию раствора, возможна при щелочном вскрытии с использованием производимых на месте реагентов и последующим использованием селективных сорбентов для выделения соединений редких земель. Важным объектом для комплексного развития редкометалльного производства Якутии может стать планируемый металлургический кластер на юге республики, где реализация пирометаллургических мощностей позволит наладить выпуск ферросплавной продукции (ферровольфрам, феррониобий, ферромарганец), которая может использоваться для выпуска высококачественной стали, в том числе на территории РС(Я).

Ключевые слова: Томтор, Агылкское, Удачная, редкие элементы, РЗМ, минерализованные рассолы, литий, вольфрам, редкометалльный кластер

Финансирование. Работа выполнена в рамках выполнения II этапа Программы комплексных научных исследований в Республике Саха (Якутия), направленных на развитие ее производительных сил и социальной сферы на 2021–2024 годы (КНИ-2); государственного задания ИГАБМ СО РАН «Мантейный магматизм, эволюция литосферы и рудоносность восточной части Сибирской платформы, геоэкология недропользования» (№ FUGG-2024-0007). Состояние, анализ и оценка изученности REE-Nb-Sc-Y руд томторского типа выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-63-10017.

Для цитирования: Матвеев А.И., Толстов А.В., Петров И.М. Схема создания редкометалльного кластера в Республике Саха (Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(1):7–27. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-1-7-27>

The proposal for developing a rare metal cluster in the Republic of Sakha (Yakutia)

Andrey I. Matveev^{✉,1,2}, Alexander V. Tolstov^{3,4}, Igor M. Petrov⁵

¹Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation

²Chersky Mining Institute of the North,

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

³Diamond and Precious Metal Geology Institute,

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

⁴V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy,

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

⁵LLC Research Group “Infomine”, Moscow, Russian Federation

✉andrei.mati@yandex.ru

Abstract

The studies conducted as part of the KNI-2 regional complex scientific research in the Republic of Sakha (Yakutia) focused on analyzing both global and domestic markets for rare metal raw materials. The findings revealed that, in addition to the well-known group of rare earth metals (REM) and rare earth elements (REE) from the unique “Tomtor” deposit, lithium extracted from hydromineral brines and tungsten sourced from the Agylkinskoye deposit are also highly sought after. To improve project efficiency and facilitate the production of high-quality products in Yakutia, we propose a model for the establishment of a consolidated rare metal cluster within the Republic of Sakha (Yakutia). This model includes three principal initiatives: the extraction of lithium from hydromineral resources, particularly the brines associated with the “Udachnaya” pipe; the extraction of rare earth metals, such as niobium and scandium (and potentially manganese), from the ores located at the Tomtor deposit; and the development of the Agylkinskoye deposit for the production of tungsten concentrate. The first two projects are planned for implementation in the Mirninsky and Oleneksky districts of the Republic of Sakha (Yakutia). These projects will focus on the production of various chemical reagents, including caustic soda, chlorine, or hydrochloric acid, utilizing local resources. Selective sorbents, either of domestic origin (such as Axionite) or produced in China, may be employed for the extraction of lithium. The resultant commercial product will be lithium carbonate, which is intended for future distribution within the Russian Federation (for instance, to the KhMZ in Krasnoyarsk) or for export to China. The primary chemical treatment of Tomtor ore to produce commercially viable industrial products, such as pyrochlore concentrate and solutions enriched with REM and scandium, can be achieved through alkaline opening using locally produced reagents. This process is followed by the application of selective sorbents to extract rare earth compounds. The proposed metallurgical cluster in the southern region of the Republic of Sakha (Yakutia) represents a substantial opportunity for the advancement of rare metal production. The establishment of pyrometallurgical facilities within this cluster could significantly enhance the production of various ferroalloy products, including ferrotungsten, ferroniobium, and ferromanganese. These materials are essential for the production of high-quality steel, particularly in the Republic of Sakha (Yakutia).

Keywords: Tomtor, Agylkinskoye, Udachnaya, rare elements, REM, mineralized brines, lithium, tungsten, rare metal cluster

Funding. This study was conducted as part of the second phase of the Complex Scientific Research Program in the Republic of Sakha (Yakutia), which aimed to enhance productive capabilities and promote social development from 2021 to 2024. Additionally, it was conducted under the state assignment for the DPMGI SB RAS titled “Mantle magmatism, lithosphere evolution, and ore content of the eastern part of the Siberian platform, geoecology of subsurface use” (No. FUG-2024-0007). The condition, analysis, and assessment of the study concerning REE-Nb-Sc-Y ores of the Tomtor type were funded by the Russian Science Foundation (grant No. 23-63-10017).

For citation: Matveev A.I., Tolstov A.V., Petrov I.M. The proposal for developing a rare metal cluster in the Republic of Sakha (Yakutia). *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(1):7–27. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-4-7-27>

Введение

Интерес к освоению месторождений редкоземельных элементов (РЗЭ) в настоящее время неуклонно растет. В нем заинтересованы все стра-

ны мира, поскольку это диктуется современными потребностями развития общества. К редкоземельным элементам/металлам (РЗЭ, РЗМ или «редким землям») относятся иттрий, лантан

и 13 лантаноидов: церий, празеодим, неодим, самарий, европий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций. Имеется классификация редких металлов А.Н. Зеликмана (табл. 1).

Все эти элементы обладают близкими свойствами и в природных условиях встречаются совместно. При этом РЗМ разделяют на три группы: «легкие» – от лантана до неодима, «средние» (от самария до эрбия) и тяжелые (от тербия до лютеция, а также иттрий). В зарубежной терминологии легкие обозначены как «light» (LREE), а средние и тяжелые чаще всего объединяют в одну группу тяжелых «heavy» (HREE). В отечественной литературе имеют место и другие названия этих групп – цериевая (легкие) и иттриевая (тяжелые).

РЗМ в качестве товарной продукции выпускаются в виде металлов, оксидов, солей (карбонатов) и другой продукции (смеси и сплавы). При этом соотношение товарных продуктов достаточно сильно различается для конкретных видов РЗМ. В частности, для церия превалирует выпуск карбоната Се, для лантана – оксида La; неодим и диспрозий выпускаются, в основном, в виде металлов (Nd, Dy). Среди смесей/сплавов, содержащих РЗМ, прежде всего следует выделить мишметалл и порошок Nd-Fe-B для выпуска магнитов.

РЗЭ относительно широко распространены в земной коре, однако при этом редко встречаются в концентрациях, подходящих для их рентабельной добычи. Основными промышленными минералами-концентраторами РЗМ являются, главным образом, бастнезит (CeCO_3F) и монацит (CePO_4). На долю бастнезитовых и монацит-бастнезитовых руд приходится около 80 % всех мировых запасов РЗМ. В основных минералах содержится разное количество РЗМ: 70–75 % в бастнезите, 55–60 % – в монаците и ксенотиме, 30–35 % – в лопарите. Ионно-абсорбционные глины характеризуются низким содержанием РЗМ – 10–15 % в минералах. При этом последние отличаются повышенной концентрацией элементов «тяжелой» группы – до 85–90 %. По этому показателю месторождение ионно-абсорбционных глин Lognan в Китае находится вне конкуренции среди других сырьевых объектов РЗМ в мире. Наибольшая часть мировых запасов РЗМ заключена в бастнезитовых месторождениях Китая и США, монацитовые месторождения получили распространение в Австралии, Бразилии, КНР,

Таблица 1

**Классификация редких металлов
(по А.Н. Зеликману)**

Table 1

**Classification of rare metals
(according to A.N. Zelikman)**

Подтип	Металл
Редкие щелочные	Литий, рубидий, цезий
Редкие щелочноземельные	Бериллий, стронций, барий
Редкоземельные	Скандий, иттрий, лантан и 13 лантаноидов (от церия до лютеция)
Редкие рассеянные	Галлий, индий, таллий, германий, рений, селен, теллур
Редкие тугоплавкие	Титан, цирконий, гафний, ванадий, ниобий, тантал, молибден, вольфрам

Источник: [1] / Source: [1].

Индии, Малайзии, ЮАР, Шри-Ланке, Таиланде, США. Остальные ресурсы РЗМ связаны с месторождениями ксенотима, ионно-адсорбционных глин, лопарита, фосфоритов, апатитов, вторичного монацита, эвдиалита и др. Оценка мировых запасов РЗМ, по разным источникам, колеблется от 100 до 150 млн т в пересчете на оксиды. В подтвержденных мировых запасах РЗМ, которые, по данным «Инфолайн», составляют около 96 млн т, лидирует Китай, его доля – около 55 % (табл. 2). Кроме того, относительно высокими долями характеризуются Россия (21 %), а также Канада и Гренландия (6 и 5 % соответственно).

Дефицит поставок редкоземельного сырья из Китая в первом десятилетии нашего века способствовал активизации деятельности по формированию новых источников РЗМ в мире. На данный момент ведется реализация проектов по разработке более 30 месторождений РЗМ в ряде стран Африки, в Канаде, США, Австралии, ЮАР и др. Эти проекты различны по плановой мощности, объему инвестиций; руды осваиваемых месторождений весьма разнятся по содержанию РЗЭ. Наиболее крупные запасы РЗМ характерны для месторождения в Гренландии Kvanefield (7 млн т), наиболее высоким содержанием РЗМ в рудах отличаются месторождения Steenkampskraal (ЮАР) – около 17 % оксидов РЗМ и Mount Weld (Австралия). Большинство других месторождений содержит от 1 до 5 %, ряд месторождений (Dubbo, Browns Range, Tanbreeze, Bokan и др.) характеризуются содержанием менее 1 % оксидов РЗМ.

Таблица 2

Оценочные запасы РЗМ в мире, млн т (в пересчете на оксиды РЗМ) [2]

Table 2

Estimated reserves of rare earth metals (REM) in the world, in million tons (converted to REM oxides) [2]

Страна	Всего	в том числе						Доля стран, %
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Y	
Китай	52,7	12,7	25,3	3,1	9,3	0,5	0,8	55
РФ	20,3	5,1	9,2	1,0	2,8	0,3	1,0	21,2
Канада	5,6	1,2	2,5	0,3	0,9	0,1	0,3	5,8
Гренландия	4,9	1,3	2,1	0,2	0,6	0,1	0,4	5,1
Австралия	3,8	0,8	1,7	0,2	0,7	0,1	0,2	3,9
Индия	3,1	0,7	1,4	0,2	0,6	0,1	0	3,2
США	2,2	0,7	1,1	0,1	0,3	0	0	2,3
Другие страны	3,2	1,0	1,5	0,1	0,4	0	0	3,4
Итого, млн т:	95,8	23,5	44,9	5,2	15,7	1,4	2,7	100

Источники: USGS [3], «Инфомайн» [2].

Sources: USGS [3], "Infomine" [2].

Объемы добычи/производства РЗМ в концентратах в пересчете на оксиды в 2018–2023 гг. представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, в 2023 г. мировой выпуск РЗМ вырос до 353 тыс. т, что на 21,6 % выше уровня предыдущего года. Крупнейшим производителем является Китай, его доля в 2018–2023 гг. составляла 63–68 % (за исключением 2022 г.). Характерным является также рост добычи РЗМ в Австралии, США, Мьянме и других странах, тем не менее, позиция Китая пока является непоколебимой. Следует отметить, что здесь представлены официальные данные по Китаю на уровне выделенной квоты производства РЗМ. Добыча и производство РЗМ

в Китае ведется в девяти провинциях, при этом в пяти из них осуществляется разработка багнетитсодержащего сырья, содержащего «легкие» РЗМ, а в четырех – ионно-адсорбционных руд, содержащих «тяжелые» РЗМ и металлы средней группы. При этом РЗМ-отрасль Китая до недавнего времени была представлена мелкими компаниями, в большинстве своем являющимися нелегальными и полунелегальными предприятиями, осуществляющими первичную добычу и переработку сырья РЗМ. Официально в КНР было зарегистрировано более 100 компаний с мощностью до 600 тыс. т РЗМ в пересчете на оксиды.

В рамках широкомасштабной операции по «зачистке» отрасли от нелегальных производителей, начавшейся в 2011–2012 гг., за счет жестких мер контроля за добычей руд РЗМ, ужесточения требований охраны окружающей среды в Китае создано шесть основных компаний-производителей РЗМ – Northern Rare Earth Group (на базе Baotou Steel Rare Earth), Chinalco (Aluminum Group of China), China Southern Rare Earth Group (на базе Ganzhou Rare Earth), Minmetals Rare Earth (China Minmetals), Guangdong Province Rare Earth Industry Group и Xiamen Tungsten. В дальнейшем, в 2021 г., благодаря укрупнению, была создана новая крупная корпорация China Rare Earth Group, в состав которой вошли следующие компании – China Southern Rare Earth Group (Ganzhou Rare Earth Group), Chinalco (Aluminum Group of China), Minmetals Rare

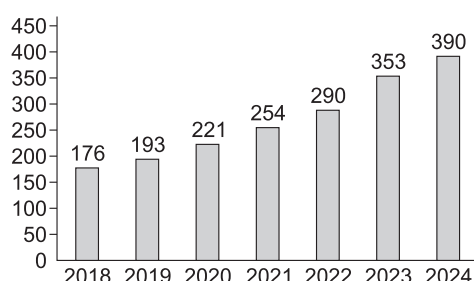


Рис. 1. Объемы добычи/производства РЗМ в концентратах в 2018–2024 гг. по странам-производителям, тыс. т оксидов РЗМ

Источник: USGS, BGS [3]

Fig. 1. Volumes of extraction/production of rare earth metals (REM) in concentrates from 2018 to 2024 by producing countries, measured in thousand tons of REM oxides

Source: USGS, BGS [3]

Таблица 3

Оценка структуры использования отдельных РЗМ при производстве различных видов продукции, %

Table 3

Assessment of the structure of individual REM usage in the production of various product types, %

Продукция	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Другие
Магниты			23	69	0,8		2	0,2	5		
Сплавы для аккумуляторных батарей	50	33,4	3,3	10	3,3						
Металлургия	26	52	5,5	16,5							
Автокатализаторы	5	90	2	3							
Катализаторы крекинга	90	10									
Полирующие порошки	31,5	65	3,5								
Стекло	24	66	1	3						2	4
Люминофоры	8,5	11				4,9	1,8	4,6		69,2	
Керамика	17	12	6	12						53	
Прочие	19	39	4	15	2		1			19	1

Другие – Ho–Tm–Yb–Lu–Er; Источник: Lynas [4, 5].

Other – Ho–Tm–Yb–Lu–Er; Source: Lynas [4, 5].

Earth (China Minmetals). Основной объем производства РЗМ традиционно сосредоточен в провинции Внутренняя Монголия. Среди других стран-производителей РЗМ следует выделить США, Мьянму и Австралию. В США компания Molycorp осуществила в 2011 г. перезапуск в эксплуатацию рудника Mountain Pass на юге штата Калифорния. Плановая мощность предприятия составляла 20 тыс. т РЗМ в пересчете на оксиды. В настоящее время компанией MP Materials осуществляется выпуск М-концентрата, который поставляется на переработку в Китай в объеме 30–40 тыс. т (в пересчете на оксиды РЗМ).

Компания Lynas (Австралия) в 2011 г. ввела в эксплуатацию рудник на месторождении Mount Weld [4, 5]. Мощность по добыче и переработке составляет 200 тыс. т руды. Основными потребителями редкоземельной продукции являются в настоящее время компании, которые осуществляют выпуск магнитов на основе РЗМ, катализаторов крекинга и автокатализаторов, полирующих порошков, люминофоров, а также использующих РЗМ для легирования стали (структура использования РЗМ приведена в табл. 3).

Применение РЗМ в ряде областей связано с использованием неразделенных РЗМ (металлургия, производство катализаторов для нефтеперерабатывающей промышленности, выпуск перезаряжаемых аккумуляторных батарей). Их оценочная доля в настоящее время не превышает 20–30 %. Наиболее крупной страной-потребителем РЗМ является Китай, доля этой страны,

по оценкам «Инфолайн», находится на уровне 75–80 %. Согласно прогнозам, в 2024–2028 гг. ежегодный прирост РЗМ составит 3–4 %. Наибольшими темпами будет расти выпуск магнитов, производство керамики, добавок в стекло и оптику, а также прочих (в том числе новых) направлений использования РЗМ. В табл. 4 приведена структура мирового потребления РЗМ по основным направлениям использования в 2018–2023 гг.

Увеличение использования редкоземельных NdFeB магнитов, связанное с развитием электротехники,

Таблица 4

Структура использования РЗМ по областям применения в 2018–2023 гг., %

Table 4

Structure of REM usage by areas of application from 2018 to 2023, %

Область использования	2018	2019	2020	2021	2023
Магнитные материалы	31	32	33	35	37
Сплавы	18	18	18	17	17
Катализаторы (крекинг, авто)	18	17	17	16	15
Полирующие материалы	13	13	13	12	11
Добавки в стекло и оптику	5	6	6	5	5
Люминофоры	3	3	3	2	2
Керамика	5	5	5	5	5
Прочее	6	6	7	7	7
Итого:	100	100	100	100	100

Источник: Lynas, «Инфолайн» [4, 5].

Source: Lynas, “Infomine” [4, 5].

Таблица 5
Прогноз темпов роста мирового рынка
РМ и РЗМ в 2023–2030 гг.

Table 5
Forecast of growth rates for the global market
of rare metals and rare earth metals in 2023–2030

Металл	Мировое потребление, тыс. т			% 2030 к 2023
	2023	2025	2030	
РЗМ	250	265	300	20
Ниобий	83	105	170	105
Литий	1008	1343	2400	138
Вольфрам	110	115	127	15
Скандий	0,03	0,05	0,3	900

Источник: экспертный анализ «Инфомайн» [5].

Source: “Infomine” [5].

тромобилей и ветроэнергетики, вызовет существенный рост использования неодима, празеодима и диспрозия (который в большей степени будет использоваться в магнитах для придания им высокой термостойкости). Именно по этим металлам прогнозируется наибольший ежегодный рост спроса. На совещании Президента РФ 24 февраля 2025 г. относительно развития редкометалльной промышленности Владимир Путин высказал следующее: «В этом году запущен национальный проект технологического лидерства. Он называется «Новые материалы и химия». В том числе, в рамках нацпроекта предстоит наладить всю линейку, полный цикл индустрии редких и редкоземельных металлов, обеспечить их добычу и переработку вплоть до производства готовых высокотехнологичных товаров с высокой добавленной стоимостью. Объём выпуска такой продукции по итогам нацпроекта должен вырасти кратно». Нашими исследованиями мирового рынка РЗМ выявлены ожидаемые высокие темпы его роста на перспективу до 2030 года (табл. 5).

Наличие на территории Якутии месторождений РЗМ, в том числе крупнейшего месторождения Томтор, предполагает маркетинговое изучение рынков отдельных металлов и оценку возможности организации производства по освоению и переработке сырья.

Методика исследований

Проведен анализ мирового и российского рынков редких и редкоземельных металлов (ниобий, РЗМ, скандий), запасами которых Якутия обладает в значительных объемах. В качестве основ-

ных источников информации по изучению рынков РМ использовались:

- данные специализированных зарубежных агентств (USGS, BGS, Roskill и др.);
- международные базы данных (World Bank, Eurostat и др.);
- данные международной торговли (UN Comtrade, Trade Map);
- данные статистических комитетов стран мира (Китай, Индия и др.), ЕАЭС (в том числе Росстата, Национального статистического комитета Республики Беларусь, Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан);
- данные Единой информационной системы в сфере закупок;
- данные базы СБИС;
- годовые отчеты зарубежных и отечественных участников рынка РМ;
- научно-техническая литература (elibrary и др.);
- база патентов ФИПС;
- база данных «Инфомайн» и т. д.

Данные источники представляются надежными и достоверными.

Результаты исследований российского рынка РЗМ и технологий

На Государственном балансе РФ числятся 18 редкометалльных месторождений, запасы РЗМ по категории А+В+С₁ оцениваются на уровне 17 млн т оксидов РЗМ, запасы по категории С₂ – около 12 млн т. При этом значительный объём содержится в трудноизвлекаемых апатитсодержащих рудах (около 10 млн т). Среднее содержание оксидов РЗМ в большинстве месторождений низкое (табл. 6), наиболее высокие характерны для Томторского (11,8 %) и Чуктуконского (5,4 %) месторождений. Относительная доля «тяжелых» РЗМ в общей сумме оксидов в балансовых месторождениях колеблется от 2–3 (Ловозерское месторождение), 4–6 (Томторское месторождение) до 50 % (Катугинское месторождение).

На долю Ловозерского комплексного редкометалльного месторождения (Кольский полуостров) приходится около 16 % запасов РЗМ России. При этом запасы Ловозерского месторождения характеризуются наличием, главным образом, РЗЭ цериевой группы. Основным минералом РЗМ Ловозерского месторождения является лопарит – комплексный минерал – титано-тантало-ниобат натрия (Ti, Nb, Ta и РЗМ), содержание которого в месторождении находится на уровне

Т а б л и ц а 6

Характеристика основных месторождений РЗМ в России

Table 6

Characteristics of major REM deposits in Russia

Месторождение	Регион	Тип	Размер запасов*	Содержание оксидов РЗМ, %	Степень освоения	Компания-разработчик (владелец лицензии)	Попутные компоненты
Ловозерское	Мурманская обл.	Лопаритовый	Крупное	1,12	Разрабатываемое	ООО «Ловозерский ГОК»	Nb, Ta, Ti, Sr, Zr
Хибинская группа (8 месторождений)	Мурманская обл.	Апатит-нефелиновый	Крупное	0,25–0,42	Разрабатывается на апатит и нефелин	ОАО «Апатит» (6 месторождений), ЗАО «Северо-Западная фосфорная компания» (2 месторождения)	Апатит, нефелин, Sr, Rb, Cs, Ga
Томторское (участок Буранный)	Республика Саха (Якутия)	Пирохлор-монацитовый	Крупное	11,8	В стадии освоения	ООО «Восток Инжиниринг»	Nb, Sc, Zr, Sr, V
Селигдарское	Республика Саха (Якутия)	Апатитовый	Крупное	0,35	Резервное		Апатит
Белозиминское	Иркутская обл.	Пирохлор-apatитовый	Крупное	0,9	Резервное		Nb, Ta, апатит
Яретское	Республика Коми	Лейкоксовая россыпь	Крупное	0,039	Подготовлено к освоению на нефть и Ti	ОАО «Ярега Руда» (Нижняя россыпь), ООО «Лукойл-Коми» (участок Титановый 1)	Nb, Ta
Улут-Танзекское	Республика Тыва	Пирохлоровый	Среднее	0,063	Резервное		Nb, Ta, Zr
Катунинское	Забайкальский край	Пирохлор-циркон-иттрио-флюоритовый	Среднее	0,37	Резервное		Nb, Ta, Zr
Чукотское	Красноярский край	Пирохлор-монацитовый	Крупное	5,38	Резервное		Fe, Mn, Nb, P

* Мелкие <100 тыс. т оксидов РЗМ, средние 100–1000 тыс. т оксидов РЗМ, крупные >1000 тыс. т оксидов РЗМ.
Источник: Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации [23].
* Small <100 thousand tons of REE oxides; medium 100–1000 thousand tons of REE oxides; large >1000 thousand tons of REE oxides.
Source: State report on the condition and use of mineral resources in the Russian Federation [23].

2,4–2,6 %, а содержание оксидов РЗМ в рудах от 0,70 до 1,45 %. В отдельных типах руд Ловозерского месторождения – эвдиалитовых луювритах и лопаритсодержащих ювитах РЗЭ концентрируются в эвдиалите, который содержит 2,0–2,5 % суммы оксидов РЗМ, преимущественно иттриевой группы. Следует отметить, что запасы эвдиалитовых руд в настоящее время детально не подсчитаны, по разным оценкам, прогнозные ресурсы оксидов РЗМ в них составляют до 15–17 млн т.

Помимо Ловозерского месторождения, большое количество балансовых запасов РЗМ (около 32 % от запасов России) сосредоточено в апатит-нефелиновых рудах Хибинской группы месторождений: Юкспорское, Апатитовый Цирк, Плато Расвумчорр, Олений Ручей и другие. В этих рудах РЗМ находятся, главным образом, в апатите, содержание в нем суммы оксидов редких земель составляет около 0,9–1,0 %. Среди РЗМ преобладают элементы цериевой группы, относительное содержание иттриевых РЗМ – около 10 %. Массовая доля суммы оксидов РЗМ в хибинских апатит-нефелиновых рудах колеблется в пределах 0,25–0,42 %.

Около 26 % запасов РЗМ России сосредоточены в Селигдарском апатитовом месторождении (Республика Саха (Якутия)). Остальные запасы РЗМ России сосредоточены в редкометалльно-apatитовом Белозиминском месторождении (Иркутская область), титановом (Ярега, Республика Коми), редкометалльных месторождениях Улуг-Танзек (Республика Тыва), Катугинское (Забайкальский край), Томторское – Республика Саха (Якутия) и Чуктуконское (Красноярский край) [6]. Одним из наиболее перспективных объектов является Томторское месторождение. Первые данные о массиве Томтор появились в 1964 г. с выявления его геологами Эрлихом Э.Н. и Гулиным С.А. и первой оценки перспективности объекта Поршневым Г.И. и Степановым Л.Л. [6]. Особый интерес к Томтору вспыхнул после выявления в 1986 г. на Томторе геологами Амакинской (Чернышевской) геологоразведочной экспедиции АК «Алмазы России-Саха» уникальных пироксоломонацит-крандаллитовых руд участка Буранный в переотложенной коре выветривания карбонатов [7–9].

Месторождение расположено в северо-западной Якутии на территории Оленекского улуса, в 400 км к югу от моря Лаптевых, и приурочено оно к массиву Томтор. Площадь массива состав-

ляет около 250 км² [7, 8]. В его пределах выделены четыре геолого-промышленных типа редкометалльно-фосфорных руд (эндогенные карбонаты, остаточные коры выветривания, переотложенные коры выветривания, осадочные отложения), каждый из которых может перерабатываться по своей технологической схеме [9]. Месторождение расположено в зоне сплошного развития многолетнемерзлых пород [10]. Изучение месторождения показало, что промышленно значимыми являются руды в переотложенных корях выветривания [11–13]. При поисково-оценочных работах выявлено три участка – Северный, Буранный и Южный, в которых руды образуют залежи («рудный пласт») в верхней части коры выветривания [14]. Руды характеризуются аномально высоким содержанием ниобия, редкоземельных элементов, алюминия, а также повышенной концентрацией титана, железа, стронция, бария, ванадия, иттрия и скандия [13, 15]. Несмотря на наличие в пределах месторождения на глубине 175 м подземных вод, рудный пласт расположен исключительно в зоне сплошной мерзлоты [16, 17].

Отличительной особенностью томторских руд является повышенное содержание оксидов РЗМ+Y (от 0,8 до 29,8 %). Y и РЗМ концентрируются, в основном, в фосфатах: монаците и рабдофаните, в составе РЗЭ преобладает цериевая группа, которая фиксируется в повышенных концентрациях в перекрывающих отложениях всего региона западной Якутии [18, 19, 20]. В настоящее время в результате проведенных разведочных работ утвержденные запасы месторождения существенно увеличены до 4 млн т оксидов РЗМ.

Производство РЗМ в России находится на низком уровне [21, 22]. Выпуск РЗМ осуществляется на ОАО «Соликамский магниевый завод» (СМЗ, Соликамск, Россия). Кроме того, РЗМ выпускает ООО «ЛИТ» (группа компаний «Скайград», Московская область). Производство РЗМ в ООО «Интермикс-Мет» (Лермонтов) и на ПАО «АКРОН» (Новгород) прекращено. Выпуск РЗМ в России в 2018–2020 гг. в пересчете на оксиды стабилизировался на уровне 2,7–2,8 тыс. т, после чего он снизился до 2,2–2,4 тыс. т, и в 2024 г., по предварительным оценкам, производство РЗМ, вопреки ожиданиями, продолжило снижение.

Уровень выпуска РЗМ в РФ определяется мощностью СМЗ, доля которого превышает 95 %. Сырьем для производства РЗМ на Соликамском магниевом заводе является лопаритовый кон-

центрат, производимый на ООО «Ловозерский ГОК» (Мурманская область). В химико-металлургическом цехе завода, который начал работу с конца 1971 г., применяется процесс хлорирования лопаритового концентрата в расплаве хлористых солей (проектная мощность цеха по переработке концентрата составляет до 13 тыс. т в год).

ООО «ТриАрк Майнинг» намеревалось инвестировать в течение 3–4 лет около 1 млрд долларов в редкоземельные проекты, один из них – строительство предприятия по переработке монацитового концентрата в г. Краснокаменск (Читинская область). В целом из концентрата планировалось получение до 40–44 тыс. т РЗМ. Для реализации этого проекта создана дочерняя структура «ТриАрк Майнинг» – ООО «РедЗем-Технологии». Строительство завода планировалось начать в 2014 г. и закончить в 2017 г. с выходом на проектную мощность в 2018 г. Однако эти планы не реализованы. Самым сложным вопросом является высокая радиоактивность концентрата и необходимость захоронения радиоактивных отходов. Стоит отметить слабое «звено» РЗМ промышленности России, базирующейся на единственном сырьевом объекте (Ловозерское месторождение), который после вступления Финляндии в НАТО стал приграничным с недружественной страной (менее 100 км от границы) с возросшими соответствующими геополитическими рисками.

Альтернативные лопаритовому концентрату источники РЗМ сырья в России имеются (в частности, это Томторское месторождение), однако сроки введения его в эксплуатацию находятся в среднесрочной перспективе. Нельзя не отметить, что в последнее время активно начались работы по извлечению РЗМ из отходов производства фосфатных удобрений при переработке апатита. Традиционно сложилось так, что из-за отсутствия мощностей по получению индивидуальных металлов РЗМ продукция СМЗ ориентирована преимущественно на экспорт, а внутренний рынок России потребляет готовую импортную РЗМ-продукцию из Китая, занимающую его львиную долю. Вместе с тем, российская минерально-сырьевая база критических РМ имеет все предпосылки (геологические, технологические и экономические) для создания отечественного конкурентоспособного редкометалльного производства, способствующего инновационному развитию России, в том числе за счет использования нетрадиционных источников минерального сырья. Согласно

прогнозу «Инфомайн», в рамках оптимистического варианта к 2025 г. прогнозируется выпуск РЗМ на уровне 3 тыс. т (за счет СМЗ и «Скайграда»). В базовом же сценарии «Инфомайн» производство РЗМ в 2025 г. составит 2,2 тыс. т (табл. 7).

В 2030 г. в оптимистическом варианте предусматривается рост производства «Скайград» и начало реализации проекта по Томтору, за счет чего производство РЗМ может составить 11 тыс. т [23–26]. В базовом варианте этот показатель существенно ниже – 6 тыс. т. Что касается прогноза потребления РЗМ в России, в подпрограмме «Развитие промышленности редких и редкоземельных металлов» заложен крайне высокий рост использования этой продукции – текущее потребление РЗМ российскими производителями в России было оценено на уровне 2000 т, что не соответствует действительности [27–30]. При этом Подпрограмма предполагала уровень потребления РЗМ по базовому варианту в 2020 г. – около 7 тыс. т, из них около 4 тыс. т должно было потребляться предприятиями Ростеха. Предполагалось, что начнут развиваться инновационные производства – потребители РЗМ, основным из которых должно стать производство магнитов на основе РЗМ для альтернативной энергетики, которое может потребовать около 3000 т индивидуальных оксидов РЗМ в год. На наш взгляд, этот показатель является завышенным, объемы использования РЗМ для выпуска магнитов находятся на ничтожно малом уровне на фоне роста импорта Россией китайских готовых магнитов и товаров с их наполнением.

Таблица 7
Прогноз производства и потребления РЗМ в России до 2030 г., тыс. т (в пересчете на оксиды)

Table 7
Forecast of production and consumption of REM in Russia until 2030, in thousand tons (converted to oxides)

Показатель	2022	2023	2024	2025	2027	2030
Производство, оптимистичный вариант	2,4	2	1,9	3	7	11
Производство, базовый вариант	2,4	2	1,9	2,2	3	6
Потребление	1,9	1,7	2	2,2	2,5	3

Источник: экспертный анализ «Инфомайн».
Source: expert analysis by “Infomine”.

Также считалось, что рост потребления РЗМ может обеспечить группа инновационных проектов, включая выпуск автомобильных катализаторов, нейтрализаторов и систем выхлопа; производство пластиковых дисплеев нового поколения, изделий из наноструктурированной керамики, оптического волокна с защитным нанопокрытием из аморфного углерода, монокристаллического твердосплавного металлорежущего инструмента с наноструктурированным покрытием и другие. С этим можно частично согласиться (особенно в области производства автомобильных катализаторов), однако на уровень потребления РЗМ в России эти направления существенного влияния не оказывают.

В нашей стране отсутствуют «драйверы» роста в лице высокотехнологичных отраслей, поэтому рост потребления РЗМ в России в ближайшие годы может произойти исключительно за счет традиционных направлений. Прогнозируемый рост потребления РЗМ связан, по нашему мнению, только с расширением выпуска катализаторов крекинга. Также мы прогнозируем рост спроса на оксид неодима при производстве каучука – как марки СКД, так и изопренового каучука СКИ. Увеличение потребления РЗМ возможно со стороны предприятий черной металлургии – при производстве высокопрочных видов стали для изготовления магистральных нефтегазопроводов, работающих в условиях Крайнего Севера и в других областях. Тем не менее, реальное потребление РЗМ в России при благоприятном развитии может составить только 3000 т к 2030 г. (см. табл. 7).

Минерально-сырьевая база редких металлов Республики Саха (Якутия) достаточно разнообразна. Основные месторождения РЗМ Якутии представлены в табл. 8.

В целом на территории РС(Я) имеется 42 месторождения различных полезных ископаемых, включающие РЗМ, которые находятся на Государственном балансе РФ. При этом из общего количества (21) в Якутии имеются месторождения лишь 10 редких металлов. Большая же часть РМ сосредоточена в месторождениях, которые имеют невысокую долю от общероссийских запасов (табл. 9).

Исключение составляют скандий (50 % запасов РФ по категории А+В+С₁), висмут (46,1), РЗМ (43,9), ниобий (21,3) и вольфрам (12,9 %). Кроме того, высоким уровнем запасов (23 %) по категории С₂ характеризуется индий, содержа-

щийся в трех месторождениях Якутии. Следует отметить также, что максимальное количество месторождений РМ на территории Якутии имеют в своем составе вольфрам (22), ванадий (6), висмут (4), индий (3) и РЗМ (2). Остальные РМ сосредоточены в отдельных месторождениях.

В развитии РЗМ отрасли РФ с учетом перспективы роста потребления (см. табл. 9) большая роль может принадлежать Якутии за счет развития, главным образом, трех проектов: разработка Томторского месторождения (РЗМ, ниобий, иттрий, скандий), Агылкинского месторождения (вольфрам, висмут, селен, теллур), а также добыча лития на основе использования гидроминерального сырья (в том числе высокоминерализованных рассолов кимберлитовой трубки «Удачная»). Наиболее реальным из них является проект по разработке Томторского месторождения (Якутия).

На месторождении наиболее изучен и разведан участок Буранный, его площадь составляет 1,5 км², мощность рудного пласта – от 2 до 42 м. Утвержденные запасы по категории А+В+С₁ составляют около 3 млн т оксидов РЗМ при содержании TR₂O₃ – 11,83 %. Руды могут рассматриваться как природный концентрат первичного обогащения, пригодный для непосредственного извлечения РЗМ, Y и других ценных компонентов. Руды содержат Th и природные радионуклиды продуктов его распада, отходы их переработки относятся к нижнему классу радиоактивности (РАО – 6 класса) и подлежат захоронению. Содержание Th в исходной руде составляет 0,12–0,16 %. Удельная активность (Аэфф) томторской руды (по максимальной активности пробы) составляет от 4 000 до 14 000 Бк/кг. Соответственно, при переработке РЗМ будут образовываться радиоактивные отходы, удельная активность которых, по предварительной оценке, составит до 65 Бк/г. За прошедшие 15 лет неоднократно были попытки начать разработку месторождения. Среди заинтересованных сторон отмечены АК «АЛРОСА» (ПАО) и ФГУП «Горно-химический комбинат» (ГХК, Железногорск) [26, 28, 31]. В частности, этими предприятиями в 2005 г. на конкурс Русских Инноваций был подан проект «Металлургический завод по производству редкоземельных металлов», его предполагаемая мощность – 3200 т цериевой группы РЗМ и 120 т триоксида иттрия. На ФГУП «КГХК» (г. Железногорск) было создано опытное производство по переработке сырья [9, 31].

Т а б л и ц а 8

Основные месторождения редких металлов на территории Республики Саха (Якутия)

Table 8

Major deposits of rare metals in the Republic of Sakha (Yakutia)

Месторождение	Степень освоения	Владелец лицензии	Тип месторождения	Компоненты (редкие металлы)	Содержание
Дружное	Разведываемое	АО «Эльконский горно-металлургический комбинат»	Золото-урановое	Ванадий	0,05 % V ₂ O ₅
				Молибден	0,075 % Mo
Непроходимое	Разведываемое	АО «Эльконский горно-металлургический комбинат»	Золото-урановое	Ванадий	0,05 % V ₂ O ₅
Курунгское	Подготавливаемое к освоению	АО «Эльконский горно-металлургический комбинат»	Золото-урановое	Ванадий	0,05 % V ₂ O ₅
Эльконское	Подготавливаемое к освоению	АО «Эльконский горно-металлургический комбинат»	Золото-урановое	Ванадий	0,05 % V ₂ O ₅
Эльконское	Разведываемое	АО «Эльконский горно-металлургический комбинат»	Золото-урановое	Ванадий	0,05 % V ₂ O ₅
Северное	Разведываемое	АО «Эльконский горно-металлургический комбинат»	Золото-урановое	Ванадий	0,05 % V ₂ O ₅
Агылкинское	Подготавливаемое к освоению	АО «Серебро Магадана»	Медно-вольфрамовое	Висмут	0,0462 % Bi
				Вольфрам	1,271 % WO ₃
				Селен	54 г/т Se
				Теллур	21 г/т Te
Одинокое	Нераспределенный фонд		Оловорудное	Висмут	0,0183 % Bi
				Вольфрам	0,028 % WO ₃
Чурпунньа	Нераспределенный фонд		Оловорудное	Висмут	0,0413 % Bi
				Вольфрам	0,044 % WO ₃
Одинокий ручей	Нераспределенный фонд		Россыпное олово	Висмут	2,8188 г/м ³
				Вольфрам	45,4 г/м ³
				Индий	0,1 г/м ³
Россыпь ручей Тирехтях	Разрабатываемое	АО «Янолово»	Россыпное олово	Вольфрам	15,4 г/м ³
				Индий	0,03 г/м ³
Депутатское	Нераспределенный фонд		Оловорудное	Индий	20 г/т
Алыс-Хая	Нераспределенный фонд		Вольфрамитовое жильное	Вольфрам	0,088 % WO ₃
Аляскитовое	Нераспределенный фонд		Вольфрамитовое жильное	Вольфрам	0,619 % WO ₃
Илинтас	Нераспределенный фонд		Вольфрамитовое жильное	Вольфрам	0,64% WO ₃
				Индий	46,2 г/т
Томторское (участок Буранный)	Подготавливаемое к освоению	ООО «Восток Инжиниринг»	Пирохлор-монацит-крандаллитовое	Ниобий	4,18 % Nb ₂ O ₅
				РЗМ	11,83 % оксидов РЗМ
				Скандий	339 г/т Sc ₂ O ₃
Селигдарское	Нераспределенный фонд		Апатит-карбонатное	РЗМ	0,35 % оксидов РЗМ

Источник: анализ Государственных балансов запасов полезных ископаемых РФ [23].

Source: State report on the condition and use of mineral resources in the Russian Federation [23].

Таблица 9
Количество месторождений
редких металлов Якутии
и доля в общероссийских запасах

Table 9
Number of rare metal deposits in Yakutia
and their share in the total Russian reserves

Компоненты (редкие металлы)	Количество месторождений на балансе	Доля Якутии в запасах РФ, %	
		A+B+C ₁	C ₂
Ванадий	6	0	1,1
Висмут	4	46,4	14,1
Вольфрам	22	12,85	2,9
Галлий	0	0	0
Гафний	0	0	0
Германий	0	0	0
Индий	3	0,23	23
Литий	0	0	0
Молибден	1	0	0,1
Ниобий	1	21,3	9,1
Рений	0	0	0
РЗМ	2	43,9	11,8
Рубидий	0	0	0
Селен	1	0	0,76
Скандий	1	90,1	51,6
Стронций	0	0	0
Тантал	0	0	0
Теллур	1	0	0,54
Титан	0	0	0
Цезий	0	0	0
Цирконий	0	0	0

Источник: анализ Государственных балансов запасов полезных ископаемых РФ [23].

Source: State report on the condition and use of mineral resources in the Russian Federation [23].

В 2014 г. совместное предприятие Госкорпорации Ростех и группы ИСТ – «ТриАрк Майнинг» – выиграло аукцион на право пользования участком недр Томторского месторождения (участок Буранный) для разведки и добычи руд ниобия, редкоземельных металлов, скандия и попутных компонентов. Специально созданная для реализации проекта освоения месторождения компания «Восток Инжиниринг» (дочерняя компания «ТриАрк Майнинг») начала разведку на участке Буранный в 2015 г. В 2015–2017 гг. на участке Буранный выполнялась доразведка, на 2018–2019 гг. была запланирована подготовка ТЭО постоянных кондиций, технического проекта и ОВОС; с 2019 по 2022 г. – намечалось

проектирование и строительство объектов инфраструктуры, на 2022–2023 гг. – строительномонтажные работы; 2023 г. – пуско-наладочные работы и запуск производства; транспортировка первой партии руды – 2024 г. Однако эти сроки не были выполнены.

Для переработки руды Томторского месторождения в Забайкальском крае создано ООО «Краснокаменский гидрометаллургический завод» (дочерняя компания «ТриАрк Майнинг»). Мощность по переработке – до 160 тыс. т руды в год. Планировавшийся ранее срок начала работы предприятия – 2024 г. Согласно отчету «Ростеха», целевой объем производства определен в 13 тыс. т разделенных оксидов РЗМ, основными видами редкоземельной продукции предполагается концентрат Nd/Pr и концентрат средне-тяжелой группы РЗМ. Совокупный объем капитальных затрат оценивался в 560 млн долларов США. Предполагалось финансирование проекта Внешэкономбанком.

Структура ООО «ТриАрк Майнинг» до недавнего времени была следующей: 50 % плюс 1 акция – у группы ИСТ, 25 % плюс 1 акция – у «РТ-Глобальные ресурсы». 24,99 % принадлежало кипрской компании Deserno, эта доля была выкуплена ООО «ПСК» Владислава Ресина. Государственная корпорация «Ростех» реализовала свою долю ООО «ТриАркМайнинг» кипрской компании Zaltama Holding, которая связана с председателем совета директоров «Восточной горнорудной компании» Олегом Мисеврой. В начале 2020 г. этот пакет перешел под контроль Tomtor Limited, которая стала единственным владельцем «ТриАрк Майнинг». В «Ростехе» выход из проекта объяснили выполнением поставленной правительством задачи и началом подготовки участка к разработке. Компания Мисевры при этом получила 24,97 % в Tomtor Limited, которая контролируется группой ИСТ через кипрскую ICT Holding Ltd и ООО «ПС-консалтинг». В настоящее время завершены геологоразведочные работы, выполнен подсчет запасов участка, проводится проработка технологических решений переработки руды. Согласно лицензионному соглашению, добыча редкоземельных металлов на месторождении Томтор запланирована на 2027–2028 гг.

В рамках Петербургского международного экономического форума в 2023 г. подписано соглашение о строительстве Краснокаменского гидрометаллургического комбината для переработки

руд Томторского месторождения. По словам, генерального директора ООО «ТриАрк Майнинг» А. Алешина, проект будет реализован в соответствии с лицензионными требованиями. Общий объем инвестиций в проект составит около 160 млрд рублей.

Вместе с тем, до настоящего дня все признаки активного освоения месторождения отсутствуют, что послужило причиной рассматриваемого сейчас вопроса об отзыве лицензии на право пользования участком недр у действующего недропользователя. Как следует из официальной информации и СМИ, интерес к освоению месторождения проявляет ПАО «Роснефть». По самым последним данным, лицензия на Буранный участок Томторского месторождения может быть передана в управление «Роснефтегаз», компания предполагает осуществлять доставку и переработку сырья в пос. Хатанга [34].

Анализ предлагаемых технологий переработки руд Томторского месторождения показал сложность с учетом применения методов химического разложения и разделения продуктов [9, 30]. Кроме этого, в связи с рассматриваемой в настоящее время перспективой добычи на Томторском месторождении также и марганцевых руд, залегающих ниже уникально богатых РЗЭ руд, возможно включение в технологическую систему промышленных производств извлечения марганцевого концентрата [7, 8].

Возможность создания гидрометаллургического предприятия для переработки руды Томторского месторождения на территории РС(Я) имеет целый ряд минусов, в частности, сложная логистика по транспортировке нескольких видов химических реагентов в больших объемах, необходимых для выщелачивания РЗМ-сырья, высокая затратность разделительного производства с «нуля» и необходимость частичного захоронения радиоактивных отходов. Тем не менее, на территории Якутии возможна организация первичной переработки исходной руды с получением готовых промышленных продуктов, включая пироксеновый концентрат, пригодный для выплавки ферроникобия, и коллективный концентрат РЗМ [9, 24]. В целом схема сети промышленных производств по извлечению ниобия, РЗМ и скандия из руды Томторского месторождения в РС(Я) представлена на рис. 2.

Литий входит в перечень основных видов стратегического минерального сырья, утвержденный Распоряжением Правительства Рос-

сийской Федерации от 30.08.2022 № 2473-р. Цели по импортозамещению редких металлов, в том числе лития, включены в «Стратегию развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2030 года», утверждена распоряжением Правительства РФ от 28 декабря 2022 г. № 4260-р.

Стратегия социально-экономического развития Республики Саха (Якутия) до 2032 г. с целевым видением до 2050 г. рассматривает как перспективную добычу Li из рассолов. Из первоначальных изысканий объектов на Li наиболее перспективным считаются рассолы из шахты и карьера рудника Удачный, которые в настоящее время обратной закачиваются в трещины в недрах, для чего вблизи действующих ГОКов АК «АЛРОСА» (ПАО) организованы узлы обратной закачки [10, 16, 17]. Предварительная оценка показала наличие концентраций Li и Br в рассолах, возможность постановки их на Государственный баланс и последующего извлечения [26]. С учетом притоков в горные выработки Удачинского ГОКа, оцениваемых в 300 м³/ч, при насыщенности их Li, Br, Rb и Sr, на текущем уровне добычи в рамках опытно-методического участка можно ежегодно получать более 350 т Li, 7 тыс. т Br, более 40 т Rb и 2 тыс. т Sr без дополнительных затрат на добычу гидроминерального сырья. Результаты опытно-промышленных работ позволяткратно увеличить добычу, для чего необходимо получение лицензии на геологоразведочные работы, проведение ГРП с последующей постановкой запасов гидроминерального сырья на баланс [25, 26].

На этапе ГРП будут уточнены данные о геологическом строении месторождения и собраны исходные данные для разработки проекта освоения месторождения и строительства инфраструктуры по добыче и обратной закачке переработанных рассолов в подземные резервуары. Производство карбоната Li в Мирнинском районе Республики Саха (Якутия) может стать первым звеном в цепочке предприятий ее комплексного развития, в рамках которого в Западной Якутии возможна организация новых отраслей: газопереработки, производства гелия, лития и критических металлов [7, 10, 16, 17, 22]. Учитывая опыт Ангарского электролизного химического комбината (АЭХК), запустившего первую линию по производству гидроксида и карбоната Li с годовой производительностью до 100 т, создание опытно-промышленного участка на свободных производственных мощностях п. Удачный реально выполнить

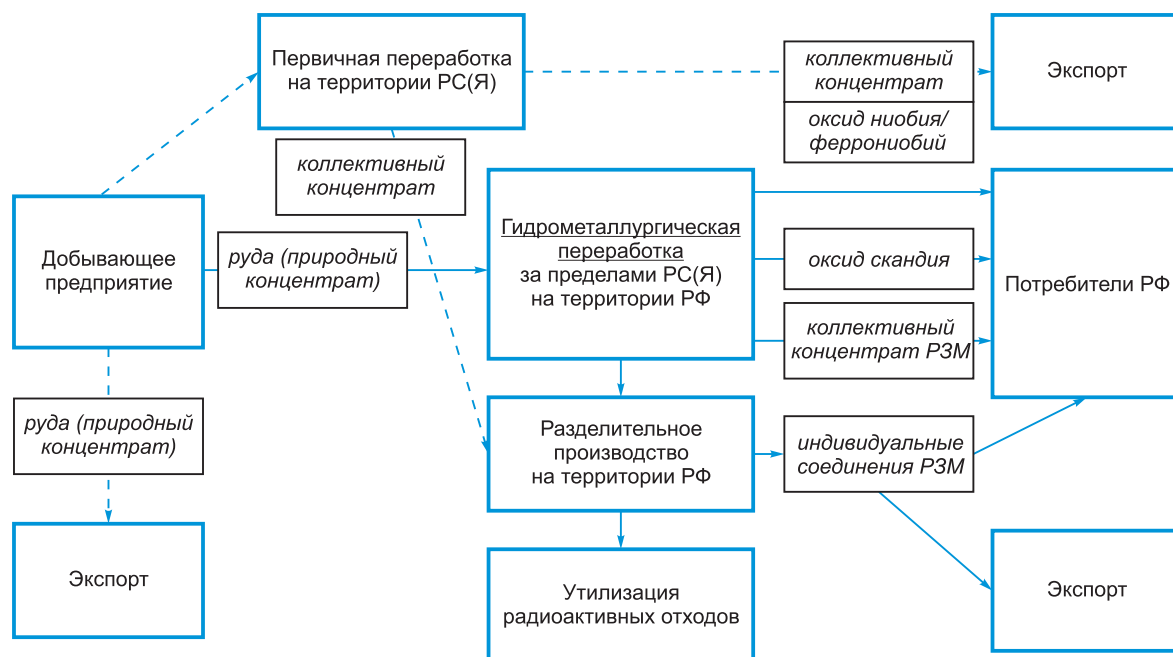


Рис. 2. Схема сети промышленных производств по извлечению ниобия, РЗМ и скандия из руды Томторского месторождения в РС(Я)

Fig. 2. Diagram illustrating the industrial production network for the extraction of niobium, rare earth metals, and scandium from the ore of the Tomtor deposit in the Republic of Sakha (Yakutia)

за два года [33]. Целевыми потребителями товарной продукции могут выступить переработчики карбоната Li для производства Li-ионных аккумуляторов в РФ и в Китае. По мере развития технологий и рынка в Якутии и на Дальнем Востоке возможна последующая переработка карбоната Li в Республике Саха (Якутия). В качестве технологии рассматриваются методы прямого извлечения Li (DLE) с получением карбоната. Технология потребует дополнительной настройки и учета региональных и климатических особенностей для каждого месторождения. В контур проекта возможно включение производства соляной кислоты, едкого натра и кальцинированной соды из каменной соли [12].

Эти соединения являются ключевыми для производства карбоната лития по технологии прямого извлечения, предлагаемой компанией Strong Technology (Китай). Принимая во внимание удаленность площадки проекта от действующих производителей, сложную логистику, необходимость строительства вместительных складов для реагентов, целесообразно в качестве альтернативы на этапе предварительного ТЭО учесть возможность производства соляной кислоты, кальцинированной соды и едкого натра непосредственно

в п. Удачный. Сырьем может быть каменная соль Кемпендэйского месторождения (Сунтарский район, Республика Саха (Якутия)), удаленного на 800 км от п. Удачный и соединенного с ним круглогодичной автодорогой. За счет деятельности по добыче алмазов в районе имеется достаточно развитая энергетическая и транспортная инфраструктура. Проект производства лития может использовать собственную сырьевую базу, газоснабжение возможно от строящегося газопровода Айхал–Удачный, энергообеспечение возможно за счет высвобождающихся мощностей при переходе с электроотопления на отопление газом, а также за счет строительства собственной газовой электростанции.

Реализация проекта возможна на условиях территории опережающего развития (ТОР), которой должен быть предоставлен специальный налоговый режим как по налогам на добычу полезных ископаемых, так и по имущественному налогу, налогу на прибыль, социальным налогам. Основным вызовом проекта является отсутствие аналогичных проектов в России, неопределенность в порядке и условиях подобного лицензирования участка недр, необходимость согласования работ для обеспечения безопасности

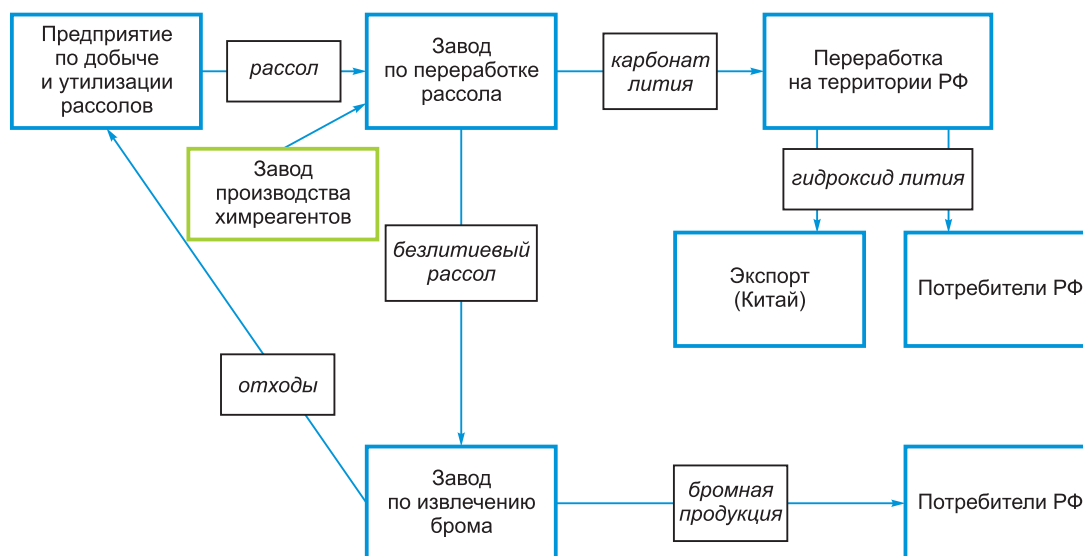


Рис. 3. Схема сети промышленных производств по извлечению лития из гидроминерального сырья в РС(Я)

Fig. 3. Diagram of the network of industrial enterprises for lithium extraction from hydromineral raw materials in the Republic of Sakha (Yakutia)

эксплуатации шахты и карьера Удачный [10, 16, 17]. Схема сети промышленных производств по извлечению лития в Мирнинском районе РС(Я) представлена на рис. 3.

Вовлечение в эксплуатацию Агылкинского месторождения **вольфрама** предусмотрено «Стратегией социально-экономического развития Республики Саха (Якутия) до 2032 г. с целевым видением до 2050 г.» и позволит реализовать комплексный подход по развитию горнодобывающей промышленности региона с положительным экономическим эффектом. Владелец лицензии на право разведки и добычи полезных ископаемых на Агылкинском участке недр сроком на 27 лет (до 2050 г.) является АО «Серебро Магадана», входящее в холдинг АО «Полиметалл». В настоящее время недропользователь ведет геологоразведочные работы. Технический проект предполагается подготовить к марту 2026 г. Помимо вольфрамового концентрата, на обогатительной фабрике будет производиться медный концентрат, а также возможно извлечение в гравитационный концентрат золота и серебра.

Агылкинский участок недр расположен в 167 км от п. Хандыга Томпонского района РС(Я). Месторождение комплексное и содержит стратегические виды полезных ископаемых – 90,8 млн т запасов вольфрама, 193,4 млн т меди и ряд попутных элементов (золото, серебро, висмут, селен, теллур, олово). Вольфрам входит в перечень ос-

новных видов стратегического минерального сырья, утвержденный Распоряжением Правительства Российской Федерации от 30.08.2022 № 2473-р. Цели по импортозамещению редких металлов, в том числе вольфрама, включены в «Стратегию развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2030 г.», утвержденную распоряжением Правительства РФ от 28 декабря 2022 г. № 4260-р. В стратегии металлургической промышленности указано, что добыча вольфрама должна быть обеспечена за счет проекта «Ростеха» на Тырныаузском месторождении в Кабардино-Балкарии. Объемы производства на нем к 2026 г. должны составить 5 тыс. т по оксиду вольфрама, что с учетом действующих производств полностью закроет потребности отечественной промышленности (сроки реализации Проекта сдвинуты до 2028 г.). В связи с планами создания в РС(Я) кластера черной металлургии, в том числе Южно-Якутского металлургического комбината (Стратегия социально-экономического развития Республики Саха (Якутия) до 2032 г. с целевым видением до 2050 г. Ц-3.11.), по оценке «Инфолайн», возможно создание на базе данного комбината производства ферровольфрама с его последующим использованием при выплавке стали. Схема сети промышленных производств по добыче вольфрама на Агылкинском месторождении в РС(Я) представлена на рис. 4.

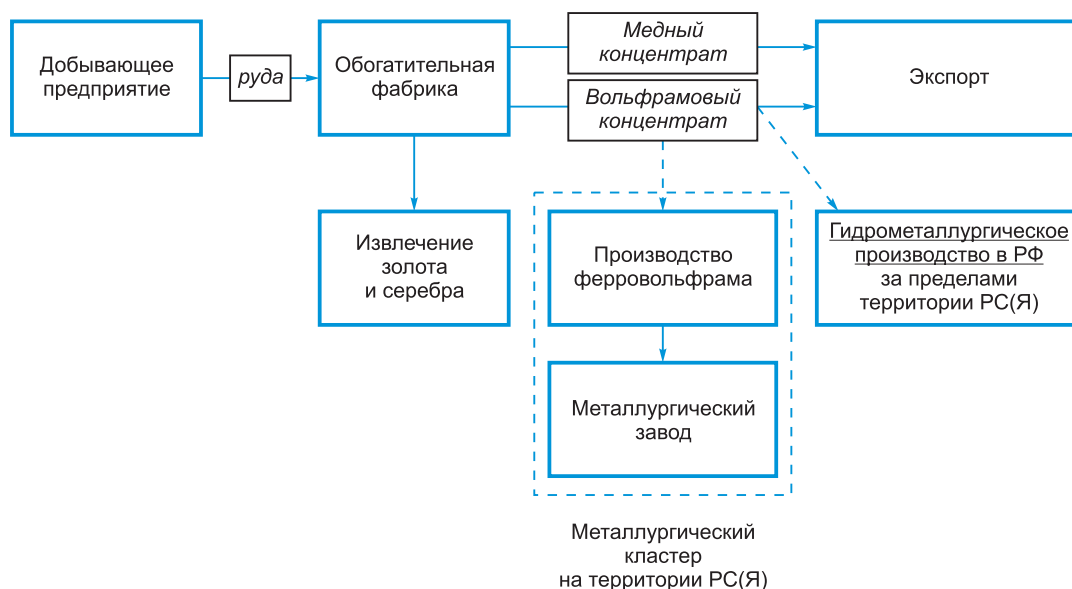


Рис. 4. Схема сети промышленных производств при добыче вольфрама на Агылкинском месторождении в РС(Я)

Fig. 4. Diagram of the industrial production network for tungsten extraction at the Agylkinskoye deposit in the Republic of Sakha (Yakutia)

Результаты и обсуждение

Реализация проектов по разработке отдельных месторождений руд РМ и РЗМ в силу ограниченности рынков сбыта готовой продукции, волатильности цен на РМ и РЗМ и технологических проблем переработки руд имеет высокие инвестиционные риски, а также невысокий экономический эффект [27, 28]. Эффективность реализации таких проектов может быть достигнута путем формирования производственных цепочек полного цикла на основе вертикальной и горизонтальной кооперации предприятий или формированием сети технологически связанных промышленных производств, связанных с потреблением и выпуском продуктов, содержащих РЗМ [7, 22, 28, 29, 30].

Такой подход позволяет создать условия для реализации нескольких инвестиционных проектов производства продуктов, востребованных в современных отраслях высоких технологий. Размещение производства в Западной Якутии дает возможность использовать перспективные ресурсы лития в подземных рассолах непосредственно на месте залегания с эксплуатацией имеющейся энергетической, логистической и транспортной инфраструктуры.

С целью повышения эффективности проектов и развития в Якутии производства продукции с высокой добавленной стоимостью возможной представляется модель создания в РС(Я) единого

редкометалльного кластера, включающего три рассмотренных проекта – по извлечению лития из гидроминерального сырья (рассолы трубки «Удачная») [16, 17], по извлечению РЗМ, ниобия, скандия (и, возможно, марганца) из руд Томторского месторождения [8, 9], также по разработке Агылкинского месторождения с получением вольфрамового концентрата (рис. 5).

Предлагается использование двух площадок с созданием мощностей по глубокой переработке руд. Первая – на территории Мирнинского района РС(Я), где возможно размещение завода по извлечению лития и брома из литийсодержащих рассолов трубки «Удачная» и создание предприятия по выпуску химических реагентов (каустическая сода, хлор или соляная кислота). Сырьем для производства этих реагентов могут быть богатые соляные природные растворы, а также местное сырье (галит). При этом возможно создание дополнительно химического производства по переработке поваренной соли (растворение, электролиз) – с получением хлора и каустической соли (NaOH). Отдельным дальнейшим переделом можно выпускать соляную кислоту (HCl), что явится принципиальным звеном в создании цепочки производственных мощностей по переработке продуктов РЗМ.

Для извлечения лития могут быть применены селективные сорбенты отечественного (например, аксионит) или китайского производства. Товар-

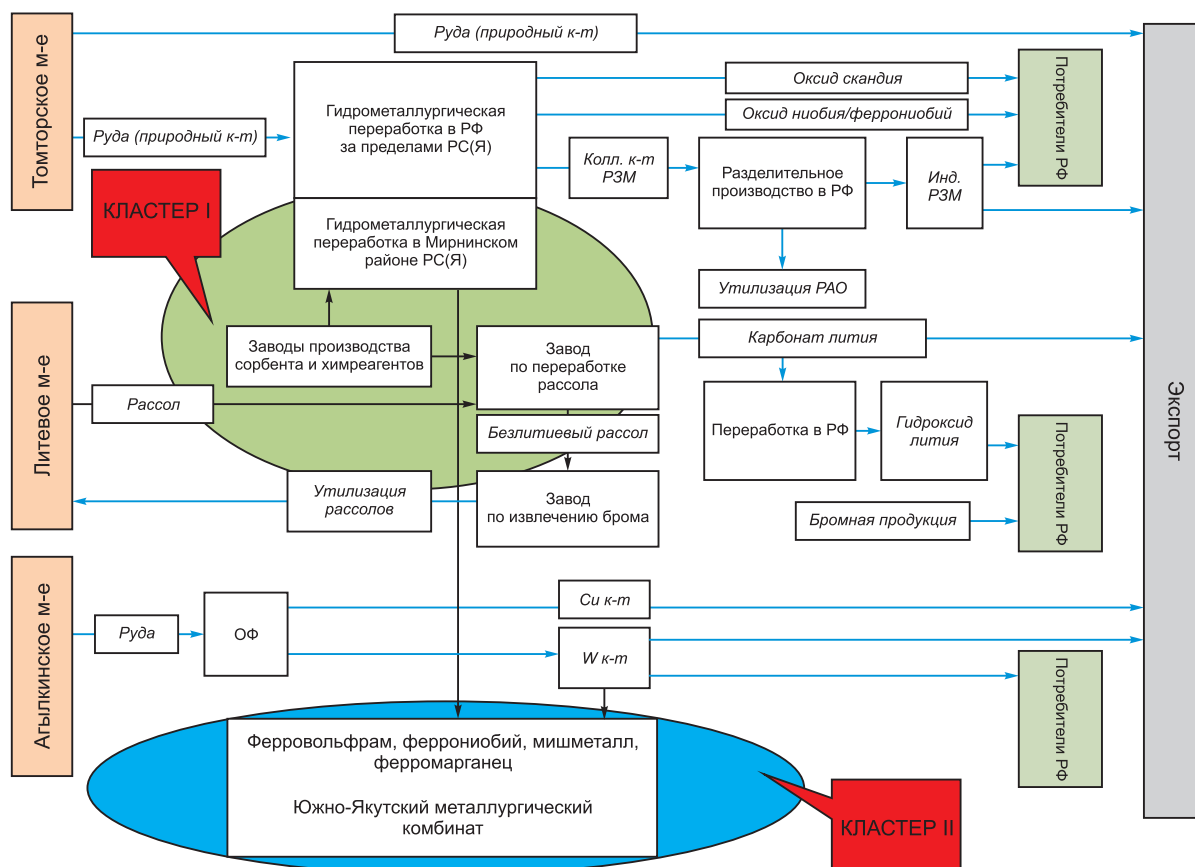


Рис. 5. Схема сети промышленных производств при создании единого редкометалльного кластера в РС(Я)

Fig. 5. Diagram of the network of industrial companies aimed at establishing a consolidated rare metal cluster in the Republic of Sakha (Yakutia)

ной продукцией при данном переделе является карбонат лития, который может поставляться в дальнейшем для использования в РФ (например, на ХМЗ в Красноярске) или на экспорт (в Китай). На Удачинской площадке, согласно разработкам ИХХТ СО РАН, возможно также проведение первичной переработки томторской руды с получением товарной продукции – пирохлорового концентрата для последующего получения из него феррониобия [9].

Возможным является также щелочное вскрытие с использованием производимой каустической соды. Продукцией в данном случае может быть наиболее богатый по РЗМ, ниобию и скандию концентрат. Для дальнейшей его переработки (согласно схеме ВИМСа) необходима азотная кислота, которая пока не производится в РС(Я). Ее выпуск должен быть налажен в случае начала добычи и переработки апатитовой руды Селигдарского месторождения, где требуются большие объемы азотной или серной кислоты.

В качестве одного из вариантов глубокой переработки руд Томторского месторождения на территории РС(Я) следует рассмотреть возможный отказ от разделения РЗМ методами экстракции и использование селективных сорбентов (в частности, других марок аксионита). Это потребует создания на базе редкометалльного кластера в Мирнинском районе специального сорбционного отделения для выделения лития из растворов и извлечения РЗМ из растворов переработки руды Томторского месторождения. Вторым возможным местом глубокой переработки редких металлов, на наш взгляд, может стать металлургический кластер на юге Якутии. Наличие там пирометаллургических мощностей является альтернативным вариантом первичной переработки томторских руд обжигом и плавкой с получением продукта, близкого по своим свойствам к мишметаллу, для дальнейшего легирования.

Получаемый в процессе флотационной переработки руд Агылкинского месторождения воль-

фрамовый концентрат может перерабатываться на создаваемых плавильных мощностях этого кластера в ферровольфрам. В случае выделения при переработке руды Томторского месторождения после щелочной и кислотной обработки первичного товарного ниобиевого продукта (пирохлорового концентрата) он может быть переработан в феррониобий на плавильных мощностях Южно-Якутского металлургического комбината. Кроме того, при принципиальном решении вопроса возможности получения марганцевого концентрата из руд Томтора [9] этот продукт также может плавиться на ферромарганец. Таким образом, на базе кластера черной металлургии возможен выпуск ферросплавной продукции широкого спектра (ферровольфрам, феррониобий, ферромарганец), которая может использоваться для выпуска высококачественной стали, в том числе на территории РС(Я) [7–9, 31].

Заключение

1. В рамках настоящего исследования проведен анализ минерально-сырьевой базы редких металлов Республики Саха (Якутии). Показано, что в Якутии расположены крупные запасы редких металлов – РЗМ, ниобия, иттрия, скандия, марганца, вольфрама и висмута. Выполнен анализ мирового и российского рынка РЗМ, ниобия, скандия, лития и вольфрама, а также висмута. Проанализированы существующие и перспективные проекты добычи РМ и РЗМ в Российской Федерации, в том числе в Республике Саха (Якутия).

2. Определены общие мировые и российские тенденции развития рынка редких и редкоземельных металлов. На основе прогнозных данных выделены наиболее перспективные проекты по добыче РМ и РЗМ на территории Республики Саха (Якутия): освоение Томторского месторождения (РЗМ, ниобий, иттрий, скандий, марганец), Агылкинского месторождения (вольфрам) и получение лития из гидроминерального сырья (в том числе на основе рассолов кимберлитовой трубки «Удачная»).

3. Разработаны принципиальные технологические схемы первичного обогащения и глубокой переработки вольфрама, лития и редкоземельных элементов, используемые на месторождениях, аналогичных вышеперечисленным. На основании SWOT-анализа проектов по разработке месторождений редких металлов в Якутии оценены возможность и последовательность освоения наиболее перспективных месторождений РМ и РЗМ.

4. Выявлены факторы, определяющие формирование моделей сети промышленных производств при переработке руд месторождений редких металлов Республики Саха (Якутии), а также проанализированы нормативные и стратегические документы, которые необходимо учитывать при формировании моделей.

5. Разработаны схемы сети промышленных производств по извлечению ниобия, РЗМ, иттрия и скандия из руд Томторского месторождения, по добыче вольфрама на Агылкинском медно-вольфрамовом месторождении, а также по извлечению лития из рассолов с учетом их частичной переработки на территории РС(Я).

6. Представлена модель создания в РС(Я) единого редкометалльного кластера на основе трех проектов, рассмотренных выше, а также проект по созданию в Якутии кластера черной металлургии, в том числе Южно-Якутского металлургического комбината, на базе которого возможен выпуск востребованной продукции с высокой добавленной стоимостью, в том числе ферровольфрама, феррониобия, ферромарганца.

Список литературы / References

1. Зеликман А.Н., Коршунов Б.Г. *Металлургия редких металлов*. М.: Металлургия; 1991. 432 с.
Zelikman A.N., Korshunov B.G. *Metallurgy of rare metals*. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1991. 432 p. (In Russ.)
2. *Обзор рынка редкоземельных элементов (металлов) в мире*. 3-е издание. М.: ООО «Исследовательская группа «Инфомайн»; 2022. Режим доступа: <http://www.infomine.ru/research/38/622> (платный доступ) (дата обращения: 11.01.2023).
Overview of the rare earth elements (metals) market in the world. 3rd edition. Moscow: Infomine Research Group LLC; 2022. Available at: <http://www.infomine.ru/research/38/622> (access requires payment) (accessed: 11.01.2023). (In Russ.)
3. BGS. World Mineral Production 2018-2022. Available at: <https://www.bgs.ac.uk/news/world-mineral-production-2018-to-2022-is-now-available/>
4. Lynas Rare Earths. Annual Report. 2018-2023. Available at: <https://lynasrareearths.com/investors-media/reporting-centre/annual-reports/> (assessed: 30.10.2024).
5. Lynas Rare Earths. Presentation. Available at: <https://lynasrareearths.com/investors-media/reporting-centre/presentations/> (accessed: 12.11.2024)
6. Толстов А.В., Тян О.А. *Геология и рудоносность массива Томтор*. Якутск: ЯНЦ СО РАН; 1999. 164 с.
Tolstov A.V., Tyan O.A. *Geology and ore content of the Tomtor massif*. Yakutsk: Yakut Scientific Center of SB RAS; 1999. 164 p. (In Russ.)
7. Толстов А.В., Лапин А.В. Поведение марганца в карбонатах и их корах выветривания на примере

массива Томтор. *Геосферные исследования*. 2024;(3): 1130121. <https://doi.org/10.17223/25421379/32/11>

Tolstov A.V., Lapin A.V. The behavior of manganese in carbonatites and their weathering crusts on the example of the Tomtor massif. *Geosphere research*. 2024;(3):113–121. <https://doi.org/10.17223/25421379/32/11> (In Russ.)

8. Толстов А.В., Лапин А.В. Перспективы Томторского рудного поля на месторождения марганца. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*. 2024;60(4a):79–86. <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2024-4a-79-86>

Tolstov A.V., Lapin A.V. The prospects of the Tomtor ore field for manganese deposits. *Geology and mineral resources of Siberia*. 2024;60(4a):79–86. <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2024-4a-79-86> (In Russ.)

9. Толстов А.В., Лапин А.В., Кузьмин В.И. Новый взгляд на геологию, технологию и экономику ниобий-иттрий-скандиевых руд Томторского месторождения. В кн.: Фридовский В.Ю. (ред.) *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России 2024: Материалы XIV Международной научно-практической конференции, посвященной 300-летию РАН и 100-летию золотодобывающей промышленности РС (Я), г. Якутск, 26–29 декабря 2024 года*. Новосибирск; 2024. С. 223–229.

Tolstov A.V., Lapin A.V., Kuzmin V.I. A New look at the geology, technology, and economics of niobium-yttrium-scandium ores of the Tomtorskoye deposit. In: Fridovsky V.Yu. (ed). *Geology and Mineral Resources of the North-East of Russia: Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference on the 300th Anniversary of the Russian Academy of Sciences and 100th Anniversary of the Gold Mining Industry of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, December 26–29, 2024*. Novosibirsk; 2024, pp. 223–229. (In Russ.)

10. Янников А.М. *Гидрогеология Мирнинского кимберлитового поля (Республика Саха (Якутия))*. Мирный: АК АЛРОСА (ПАО); 2021. 238 с.

Yannikov A.M. *Hydrogeology of the Mirninsky kimberlite field (Republic of Sakha (Yakutia))*. Mirny: AK ALROSA (PAO); 2021. 238 p. (In Russ.)

11. Лапин А.В., Толстов А.В., Набелкин О.А., Куликова И.М. Уникальная поликомпонентная рудная формация кор выветривания карбонатитов: новые перспективы – Fe, Mn, Ti, V. *Геология и геофизика*. 2024; 65(8):1080–1092. <https://doi.org/10.15372/GiG2023206>

Lapin A.V., Tolstov A.V., Nabelkin O.A., Kulikova I.M. Unique multicomponent Fe, Mn, Ti, V mineralization in laterite profiles of weathered carbonatites: new prospects. *Russian Geology and Geophysics*. 2024;65(8): 927–935. <https://doi.org/10.2113/RGG20234676>

12. Похиленко Н.П., Толстов А.В. Перспективы освоения Томторского месторождения комплексных ниобий-редкоземельных руд. *ЭКО*. 2012;461(11):17–27.

Pokhilenko N.P., Tolstov A.V. Prospects for the development of the Tomtor deposit of complex niobium-rare earth ores. *ECO*. 2012;461(11):17–27. (In Russ.)

13. Похиленко Н.П., Крюков В.А., Толстов А.В., Самсонов Н.Ю. Томтор как приоритетный инвестиционный проект обеспечения России собственным источником редкоземельных элементов. *ЭКО*. 2014; 476;(2):22–35.

Pokhilenko N.P., Kryukov V.A., Tolstov A.V., Samsonov N.Yu. Tomtor as priority investment project to provide Russia with its own source of rare earth elements. *ECO*. 2014;476;(2):22–35. (In Russ.)

14. Толстов А.В., Похиленко Н.П., Самсонов Н.Ю. Новые возможности получения редкоземельных элементов из единого арктического сырьевого источника. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия*. 2017;10(1):125–138. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0012>

Tolstov A.V., Pokhilenko N.P., Samsonov N.Yu. New opportunities for producing rare earth elements one of the arctic raw material source. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry* 2017;10(1):125–138. <https://doi.org/10.17516/1998-2836-0012>. (In Russ.)

15. Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Толстов А.В. и др. Уникальное Nb-REE месторождение Томтор (Арктическая Сибирь). В кн.: *Металлогения древних и современных океанов-2024. Рудогенез*. Миасс: ЮУ ФНИЦ МиГ УрО РАН, 2024. С. 119–122.

Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Tolstov A.V., et al. Unique Nb-REE Tomtor deposit (Arctic Siberia). In: *Metallogeny of ancient and modern oceans-2024. Ore genesis*. Miass: SU FRC MG UB RAS, 2024, pp. 119–122. (In Russ.)

16. Янников А.М. *Гидрогеология Алакит-Мархинского кимберлитового поля Республика Саха (Якутия)*. Мирный: АК АЛРОСА (ПАО); 2022. 131 с.

Yannikov A.M. *Hydrogeology of the Alakit-Markha kimberlite field, Republic of Sakha (Yakutia)*. Mirny: AK ALROSA (PAO); 2022. 131 p. (In Russ.)

17. Янников А.М. *Гидрогеология Далдынского кимберлитового поля: Республика Саха (Якутия)*. Мирный: АК АЛРОСА (ПАО); 2023. 305 с.

Yannikov A.M. *Hydrogeology of the Daldyn kimberlite field: Republic of Sakha (Yakutia)*. Mirny: AK ALROSA (PAO); 2023. 305 p. (In Russ.)

18. Игнатов П.А., Еременко Р.У., Толстов А.В., Овчинников И.М. Перспективы обнаружения месторождений стратегических полезных ископаемых (Cu, Co, Ni, EPG, Sc, V, Li, REE, Sr, графит, углеводород) в алмазоносных районах юга Западной Якутии. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2024;66(1):65–78. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-1-65-78>.

Ignatov P.A., Eremenko R.U., Tolstov A.V., Ovchinnikov I.M. Prospects for the discovery of strategic mineral deposits (Cu, Co, Ni, EPG, Sc, V, Li, REE, Sr, graphite, hydrocarbons) in the diamond-bearing areas of the South of Western Yakutia. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2024; 66(1):65–78. (In Russ.) <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2024-66-1-65-78>. (In Russ.)

19. Крюков В.А., Толстов А.В., Афанасьев В.П. и др. Обеспечение российской промышленности высокотехнологичной сырьевой продукцией на основе гигантских месторождений Арктики – Томторского ниобий-редкоземельного и Попигайского сверхтвёрдого абразивного материала. В кн.: *Север и Арктика в новой парадигме мирового развития. Лузинские чтения – 2016, г. Апатиты, 14–16 апреля 2016 года*. Апатиты: Институт экономических проблем им. Г.П. Лузина Кольского научного центра РАНС. 204–206.
- Kryukov V.A., Tolstov A.V., Afanasyev V.P., et al. Provision of the Russian industry with high-tech raw materials based on giant deposits in the Arctic: Tomtor niobium-rare earth deposits and Popigay superhard abrasive materials. In: *The North and the Arctic in a New Paradigm of Global Development, Luzin Readings – 2016, Apatity, April 14–16, 2016*. Apatity: Luzin Institute of Economic Problems, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences, pp. 204–206. (In Russ.)
20. Лазарева Е.В., Жмодик С.М., Добрецов Н.Л. и др. Главные рудообразующие минералы аномально богатых руд месторождения Томтор (Арктическая Сибирь). *Геология и геофизика*. 2015;56(6):1080–1115. <https://doi.org/10.15372/GiG20150603>
- Lazareva E.V., Zhmodik S.M., Dobretsov N.L., et al. Main minerals of abnormally high-grade ores of the Tomtor deposit (Arctic Siberia). *Russian Geology and Geophysics*. 2015;56(6):844–873. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.05.003>
21. Похиленко Н.П., Крюков В.А., Толстов А.В., Самсонов Н.Ю. Создание сильной редкоземельной промышленности: без госкорпораций не осилить. *ЭКО*. 2016;506(8):25–36.
- Pokhilenko N.P., Kryukov V.A., Tolstov A.V., Samsonov N.Yu. Creating a strong rare earth industry in Russia: state corporations without not overpower. *ECO*. 2016;506(8):25–36. (In Russ.)
22. Похиленко Н.П., Толстов А.В., Афанасьев В.П., Самсонов Н.Ю. Новые механизмы государственного управления минерально-сырьевой базы стратегических полезных ископаемых Арктической зоны Сибири и Дальнего Востока. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2016;(5):60–63.
- Pokhilenko N.P., Tolstov A.V., Afanasyev V.P., Samsonov N.Y. New mechanisms of state management of the mineral resource base of strategic minerals in the Arctic zone of Siberia and the Far East. *Mineral Resources of Russia. Economics & Management*. 2016;(5):60–63. (In Russ.)
23. Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации, 2018–2022. Режим обращения: <https://vims-geo.ru/ru/activity/iacn/russia/gosdokladi/> (дата обращения: 01.10.2024)
- State Report on the state and use of mineral resources of the Russian Federation, 2018–2022. Available at: <https://vims-geo.ru/ru/activity/iacn/russia/gosdokladi/> (accessed: 01.10.2024)
24. Chagnes A., Swiatowska J. *Lithium Process Chemistry: Resources, Extraction, Batteries, and Recycling*. 2015
25. SQM. Available at: https://s25.q4cdn.com/757756353/files/doc_financials/2023/ar/annual-report-2023_final.pdf (accessed: 01.11.2024)
26. Albemarle. Available at: <https://investors.albemarle.com/financials/annual-reports/default.aspx> (accessed: 01.11.2024)
27. Крюков В.А., Толстов А.В., Самсонов Н.Ю. Стратегическое значение редкоземельных металлов в мире и в России. *ЭКО*. 2012;461(11):5–16. (In Russ.)
- Kryukov V.A., Tolstov A.V., Samsonov N.Yu. The strategic importance of rare earth metals in the world and in Russia. *ECO*. 2012;461(11):5–16.
28. Похиленко Н.П., Афанасьев В.П., Толстов А.В. и др. Перспективы развития и проблемы освоения сырьевой базы дефицитных стратегических полезных ископаемых Сибири. *Геология рудных месторождений*. 2023;65(5):476–492. <https://doi.org/10.31857/S0016777023050088>
- Pokhilenko N.P., Afanasyev V.P., Tolstov A.V., et al. Perspectives of the development and problems of exploration of a resource base of deficient strategic mineral deposits of Siberia. *Geology of Ore Deposits*. 2023; 65(5):494–509. (In Russ.)
29. Толстов А.В., Самсонов Н.Ю. Томтор: геология, технологии, экономика. *ЭКО*. 2014;476(2):36–44.
- Tolstov A.V., Samsonov N.Yu. Tomtor: geology, technologies, economics. *ECO*. 2014;476(2):36–44. (In Russ.)
30. Толстов А.В., Лапин А.В., Похиленко Н.П., Овчинников К.В. Скандий и иттрий Томторского рудного поля. *Цветная металлургия*. 2015;(4):37–43.
- Tolstov A.V., Lapin A.V., Pokhilenko N.P., Ovchinnikov K.V. Scandium and Yttrium of Tomtor ore field. *Non-ferrous Metals*. 2015;(4):37–43.
31. Толстов А.В., Гунин А.П. Комплексная оценка Томторского месторождения. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2001;(11):144–160.
- Tolstov A.V., Gunin A.P. *Comprehensive assessment of the Tomtor field. Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*. 2001; (11):144–160.
32. Редкие земли засверкали «Звездами». *Коммерсант*. 08.11.2024. Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/7284777> (дата обращения: 09.11.2024)
- Rare Earths Sparkled with “Stars”. *Kommersant*, 08.11.2024. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/7284777> (accessed: 09.11.2024)
33. <https://strana-rosatom.ru/2021/03/26/na-aehk-zapustili-opytuju-ustanovku-p/>.

Об авторах

МАТВЕЕВ Андрей Иннокентьевич, доктор технических наук, главный ученый секретарь, Академия наук Республики Саха (Якутия), г. Якутск, Российская Федерация; главный научный сотрудник, Институт горного дела

Севера им. Н.В. Черского СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-4298-5990>, ResearcherID: AAO-6487-2020, SPIN: 6263-7533, Scopus Author ID: 7102723417, e-mail: andrei.mati@yandex.ru

ТОЛСТОВ Александр Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геологии благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация; ведущий научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-3863-5071>, ResearcherID: O-2643-2013, Scopus Author ID: 6603548567, SPIN: 7895-6601, e-mail: tols61@mail.ru

ПЕТРОВ Игорь Михайлович, доктор технических наук, генеральный директор, ООО «Исследовательская группа «Инфомайн», г. Москва, Российская Федерация, Scopus Author ID: 7101601440, SPIN: 9035-7080, e-mail: igo382@yandex.ru

Вклад авторов

Матвеев А.И. – разработка концепции, методология, верификация данных, выполнение анализа, администрирование данных, создание черновика рукописи и редактирование текста статьи, визуализация, руководство исследованием по горнорудной части, администрирование проекта; **Толстов А.В.** – разработка концепции, методология, верификация и анализ литературных и архивных данных по геолого-минералогическим и лабораторно-аналитическим исследованиям, создание и редактирование черновика рукописи, визуализация, руководство исследованием по минерально-сырьевому направлению; **Петров И.М.** – разработка концепции, методология, верификация данных, визуализация и анализ современного состояния рынков редких металлов, создание черновика рукописи, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Двое из авторов – доктор геолого-минералогических наук Толстов А.В. и доктор технических наук Матвеев А.И. являются членами редколлегии журнала «Природные ресурсы Арктики и Субарктики». Авторам неизвестно о любом потенциальном конфликте интересов, связанном с данной статьей.

About the authors

MATVEEV, Andrey Innokentevich, Dr. Sci. (Eng.), Scientific Secretary, Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russian Federation; Chief Researcher, Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-4298-5990>, ResearcherID: AAO-6487-2020, SPIN: 6263-7533, Scopus Author ID: 7102723417, e-mail: andrei.mati@yandex.ru

TOLSTOV, Alexander Vasilevich, Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; Leading Researcher, V.S. Sobolev Institute of Geology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-3863-5071>, ResearcherID: O-2643-2013, Scopus Author ID: 6603548567, SPIN: 7895-6601, e-mail: tols61@mail.ru

PETROV, Igor Mikhaylovich, Dr. Sci. (Eng.), CEO, LLC Research Group “Infomine”, Moscow, Russian Federation, Scopus Author ID: 7101601440, SPIN: 9035-7080, e-mail: igo382@yandex.ru

Authors' contribution

Matveev A.I. – conceptualization, methodology, validation, analysis, data administration, writing – original draft, writing – review & editing, visualization, supervision of the mining part, project administration; **Tolstov A.V.** – conceptualization, methodology, verification and analysis of literary and archival data on geological, mineralogical and laboratory analytical research, writing – original draft, writing – review & editing, visualization, supervision of research in the mineral resource area; **Petrov I.M.** – conceptualization, methodology, data verification, visualization and analysis of the current state of rare metals markets, writing – original draft, writing – review & editing

Conflict of interest

Two of the authors, Tolstov A.V., Dr. Sci. (Geol. and Mineral.) and Matveev A.I., Dr. Sci. (Eng.), are members of the Editorial Board for the journal “Arctic and Subarctic Natural Resources”. The authors are unaware of any potential conflict of interest relating to this article.

Поступила в редакцию / Submitted 28.02.2025

Поступила после рецензирования / Revised 04.03.2025

Принята к публикации / Accepted 11.03.2025