

## КРИТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОСВОЕНИЯ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ – ОТ ПРОГНОЗА И ДОБЫЧИ РУД К ИЗВЛЕЧЕНИЮ МЕТАЛЛОВ И СОЗДАНИЮ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ

© 2024 г. С.М. Алдошин<sup>а,\*</sup>

<sup>а</sup>Российская академия наук

\*E-mail: sma@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 16.01.2024 г.  
Поступила после доработки 26.01.2024 г.  
Принята к публикации 02.03.2024 г.

В статье рассмотрено современное состояние минерально-сырьевой базы России, вопросы достижения импортонезависимости в обеспечении промышленности России стратегическими металлами. Обсуждаются проблемы поисков и разведки руд таких металлов, их обогащения и извлечения. Приведены предлагаемые Российской академией наук решения некоторых из выявленных проблем. Значительное внимание уделено добыче и извлечению лития и редкоземельных элементов. Статья подготовлена на основе доклада на научной сессии Общего собрания членов РАН 12 декабря 2023 г. с использованием материалов совместного заседания Научного совета РАН по материалам и наноматериалам, Межведомственного научного совета РАН по развитию минерально-сырьевой базы и её рациональному использованию, бюро Отделения химии и наук о материалах РАН, бюро Отделения наук о Земле РАН и при участии представителей Госкорпорации “Росатом”, Минпромторга России и Минобрнауки России.

*Ключевые слова:* минерально-сырьевая база, стратегические металлы, импортонезависимость, литий, редкоземельные элементы.

DOI: 10.31857/S0869587324030055, EDN: GGVQBD

**Состояние и использование минерально-сырьевых ресурсов России.** Наиболее актуальная на сегодня государственная задача – достижение технологического суверенитета России и локализация всех связанных технологических цепочек, не может быть решена без прочной опоры на отечественное минеральное сырьё. А значит, необходимо восстанавливать и развивать добывающие отрасли. В настоящее время промышленность России в значи-

тельной степени зависит от импортных поставок стратегических металлов, по отдельным позициям эта зависимость достигает 100%. Несмотря на это, многие отечественные месторождения стратегического минерального сырья, критически зависимого от импорта, не разрабатываются в связи с их низкой рентабельностью и отсутствием спроса на металлы.

Согласно государственному докладу “О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году” и Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года (распоряжение Правительства Российской Федерации от 22 декабря 2018 г. № 2914-р), балансовые геологические запасы, то есть те, которые экономически выгодно разрабатывать, обеспечивают до 2035 г. потребности высокотехнологичной промышленности стратегическими металлами лишь семнадцати наименований (медь, никель, олово, вольфрам, молибден, тантал, ниобий, кобальт, скандий, германий, платиноиды, железо и др.). Достигнутые уровни добычи свинца,



АЛДОШИН Сергей Михайлович – академик РАН, вице-президент РАН.

сурьмы, золота, серебра, цинка обеспечены запасами разрабатываемых месторождений на период менее 15 лет. К дефицитным даже при нынешних уровнях их потребления относится большая часть стратегических металлов, необходимых для высокотехнологичных наукоёмких производств, включая атомную промышленность, микроэлектронику, оборонную промышленность, авиационную, космическую отрасль, металлургию, машиностроение, автомобилестроение, “зелёную” энергетику, медицинское оборудование. Это уран, марганец, хром, титан, алюминий, цирконий, гафний, бериллий, литий, рений, редкие металлы и редкоземельные элементы (скандий, иттрий, лантан и лантаноиды, висмут, кадмий, галлий) [1–4].

В соответствии с пунктом 3а перечня поручений Президента Российской Федерации от 28 июня 2022 г. № Пр-1130, направленных на развитие перспективной минерально-сырьевой базы, Научным советом РАН по материалам и наноматериалам и Межведомственным научным советом РАН по развитию минерально-сырьевой базы и её рациональному использованию выполнен комплексный анализ минерально-сырьевой базы (МСБ) России, который показал, что наша страна может полностью заместить импорт стратегического минерального сырья за счёт собственных ресурсов. Для этого необходима работа по всем этапам, включая поиск и разведку новых месторождений, в том числе на слабо изученных арктических территориях Сибири и Дальнего Востока, разработку новых прорывных технологий добычи, обогащения, извлечения и переработки минерального сырья, создание конкурентоспособного производства особо чистых редких металлов.

Эксперты РАН отмечают, что минерально-сырьевая база металлов России используется крайне неэффективно. Она сосредоточена главным образом в открытых более 30–50 лет назад уникальных и крупных месторождениях, для которых определены запасы и резервы, разработаны технологии добычи, обогащения и извлечения главных промышленных металлов. При этом достоверные сведения о запасах, закономерностях размещения и минералах-концентраторах таких редких рассеянных стратегических металлов и редкоземельных металлов (РЗМ), как индий, теллур, рений, гафний, скандий, селен, кадмий, галлий, германий, висмут, извлекаемых в качестве попутных или побочных компонентов, отсутствуют. Это приводит к тому, что редкие и рассеянные металлы не извлекаются при переработке, складируются в хвостохранилищах или экспортируются в продуктах обогащения – концентратах.

Особо следует отметить проблему использования комплексных руд редкоземельных металлов. Основные ресурсы РЗМ сосредоточены в апатит-нефелиновых рудах в Мурманской области [1, 2]. Добыча их составляет около 120 тыс. тонн в год, но извлечение не осуществляется [2]. Отсутствует как экономиче-

ски рентабельная промышленная технология разделения РЗМ и получения продуктов, востребованных производством, так и спрос на металлы отечественной промышленности. Большая часть коллективного концентрата карбонатов редкоземельных металлов, получаемого на Ловозёрском месторождении из лопарита  $((\text{Na}, \text{Ce}, \text{Sr})(\text{Ce}, \text{Th})_2(\text{Ti}, \text{Nb})_2\text{O}_6)$  – главного минерала-концентратора РЗМ, экспортируется из-за отсутствия промышленных мощностей по их разделению. Не производится извлечение марганца, хрома, титана, необходимых для производства высококачественных сталей, как и рения, вольфрама и других металлов, используемых в производстве высококачественных жаропрочных сплавов. Из-за низкого качества сырья, несмотря на значительные ресурсы лития, бериллия и других редких металлов, добыча их не ведётся. Немало и других примеров столь нерационального использования минерально-сырьевой базы [3, 4].

В России рынок попутных металлов в сравнении с главными металлами незначителен. Это приводит к потерям стратегических металлов при переработке комплексных руд, и если не изменить требования к эксплуатации месторождений, то такое положение сохранится и в будущем. Как уже сказано, развитие минерально-сырьевой базы стратегических металлов сдерживается отсутствием спроса внутри страны и преобладающим экспортом продуктов низкого передела [5].

Институты, находящиеся под научно-методическим руководством Российской академии наук, при выполнении программы фундаментальных исследований получили принципиально новые результаты, касающиеся закономерностей размещения крупных и уникальных месторождений стратегических металлов, присутствия редких и рассеянных элементов в минералах-концентраторах. На базе современных знаний разработаны геолого-генетические модели провинций и месторождений, развиваются геофизические методы поисков и разведки рудных месторождений, инновационная приборная база, новые системы добычи и обогащения руд, селективного извлечения металлов из комплексных руд и техногенных отходов. Однако эти результаты практически не используются прежде всего потому, что ведущие горнодобывающие компании обеспечены на ближайшие годы резервами и ресурсами, производят сырьё главным образом на экспорт и не заинтересованы в организации глубокой переработки руд. Это приводит к потерям рассеянных металлов, таких как рений, индий, галлий, германий и других, столь необходимых для развития высокотехнологичной промышленности. Несмотря на значительные ресурсы лития, используемого для производства аккумуляторов, в России этот металл до сих пор не добывается. Отсутствует и добыча бериллия.

**Деятельность РАН по развитию минерально-сырьевой базы.** В своём поручении от 28 июня 2022 г.

№ Пр-1130 Президент Российской Федерации поручил Правительству Российской Федерации с участием Российской академии наук и госкорпорации «Росатом» определить приоритеты развития минерально-сырьевой базы твёрдых полезных ископаемых и подготовить предложения по разработке и реализации федеральной научно-технической программы, направленной на обеспечение комплексного сопровождения геологоразведочных работ, добычу и промышленную переработку твёрдых полезных ископаемых, а также ускоренное замещение импортных технологий и оборудования российскими аналогами. Реализация программы предполагает не только создание технологий от стадии прогноза и поисков месторождений до глубокой переработки высокотехнологичных видов сырья, но также разработку и запуск производства отечественного оборудования, подготовку кадров и, что не менее важно, формирование и развитие устойчивого поступательно растущего внутреннего спроса на получаемую продукцию высоких переделов.

Российская академия наук совместно с организациями Минобрнауки и Минприроды России разработала концепцию программы, в которую включены основные мероприятия по развитию минерально-сырьевой базы страны, и представила её на рассмотрение в Правительство Российской Федерации. Достижение целевых ориентиров программы требует изменения принципов взаимодействия всех вовлечённых в процесс её реализации сторон — недропользователей, государства и общества в лице муниципалитетов и жителей территорий, на которых будут реализовываться проекты.

Президиум РАН 11 апреля 2023 г. провёл специальное заседание и принял постановление «О состоянии и перспективах развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации». Создан Межведомственный совет по минерально-сырьевой базе и её рациональному использованию, в Минобрнауки и Минприроды России направлены рекомендации, касающиеся создания консорциумов и центров для разработки отечественных и замещения импортных технологий и оборудования на всех этапах, от поиска до извлечения высокотехнологичных металлов. Основные направления работ были определены 19 ноября 2023 г. на стратегической совместной сессии Научного совета РАН по материалам и наноматериалам, Межведомственного научного совета РАН по развитию минерально-сырьевой базы и её рациональному использованию, бюро Отделения химии и наук о материалах и бюро Отделения наук о Земле РАН с участием представителей Росатома, Минпромторга, Минприроды, Минобрнауки России.

Основой для практической реализации поставленных задач служит «Перечень основных видов стратегического минерального сырья», утверждённый распоряжением Правительства Российской Федерации от 30.08.2022 № 2473-р. К стратегическому

относится минеральное сырьё, которое отражает геополитические интересы страны, имеет особое значение для обеспечения её экономического развития, обороны и безопасности. Перечень такого сырья и материалов устанавливается Правительством Российской Федерации и может меняться в зависимости от военно-политических и экономических приоритетов государства, структуры материального производства и прогнозируемой обстановки, конъюнктуры мирового рынка, состояния внешнеэкономических связей и других обстоятельств.

В настоящее время перечень включает 61 позицию, в том числе: нефть, природный газ, калийные соли, бокситы, алмазы, графит, подземные воды, фосфаты (апатитовые руды), особо чистое кварцевое сырьё, плавленый шпат, а также 51 химический элемент (все элементы — металлы). Российская академия наук рекомендует включить в перечень ещё шесть элементов: бор, мышьяк, селен, кадмий, теллур, висмут. Это необходимо для обеспечения стратегическими металлами всех высокотехнологичных производств.

Попадающая часть дефицитных видов стратегического минерального сырья относится к группе редких и редкоземельных металлов. Минпромторг России и Минприроды России составили список из 17 стратегических дефицитных видов минерального сырья. В него входят 12 видов сырья, которые либо имеются в России, либо их получение обеспечено надёжными каналами импорта (на рисунке 1 показаны синим цветом), и пять критически зависимых от импорта видов минерального сырья, которые в стране не добываются и импорт которых ненадежен (на рисунке 1 показаны красным цветом). Пять критически зависимых от импорта металлов: марганец, титан, литий, ниобий и редкоземельные элементы (РЗЭ) — европий, диспрозий, неодим, лютеций, празеодим, тербий, лантан, церий — играют наиболее важную роль в создании и функционировании производств перспективной высокотехнологичной продукции.

**Проблемы поисков и разведки стратегических металлов.** По резервам и ресурсам практически всех металлов Россия входит в первую десятку стран. Тем не менее основная часть необходимых металлов импортируется, и наоборот, основная часть добываемого вывозится в виде концентратов главных металлов, но также содержащих и другие высокотехнологичные металлы, необходимые для промышленности. Россия богата минеральными ресурсами, но большинство открытых месторождений расположено в труднодоступных районах с неразвитой инфраструктурой (рис. 2).

Одно из основных направлений фундаментальных исследований в области минерагении — поиск ответов на вопросы генезиса месторождений. Их цель — понять, какие из наблюдаемых геологических, петрологических, минералогических и гео-



**ИМПОРТОЗАВИСИМЫЕ СТРАТЕГИЧЕСКИЕ ВИДЫ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

**17** стратегических дефицитных видов минерального сырья

12

<b>U</b> уран	<b>W</b> вольфрам	<b>Cr</b> хром
<b>Mo</b> молибден	Бокситы	<b>Be</b> бериллий
<b>Ta</b> тантал	<b>Zr</b> цирконий	<b>V</b> ванадий
<b>Re</b> рений	Графит	Плакиковый шпат

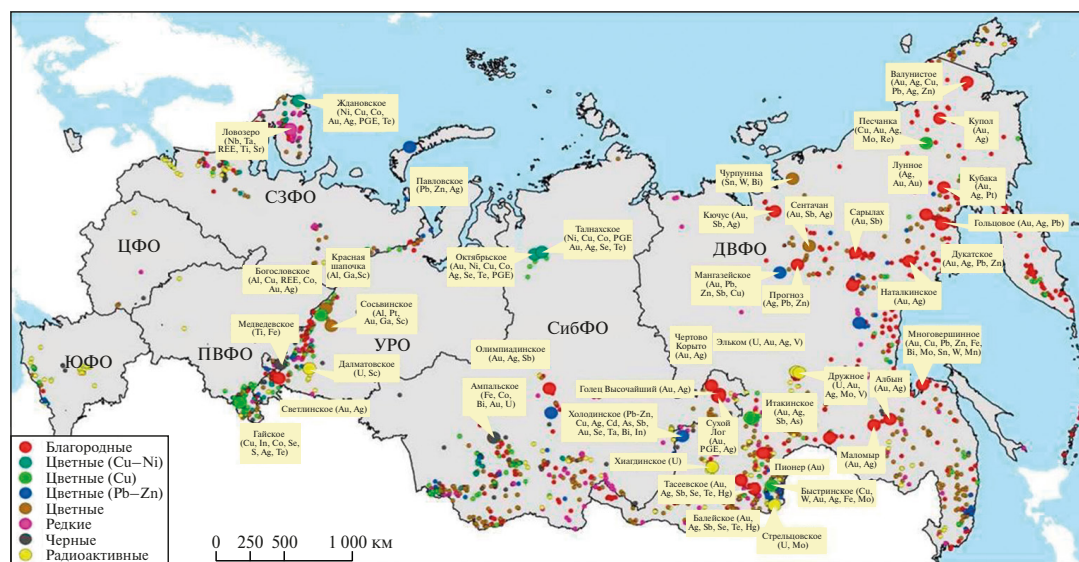
5 Критически зависимых от импорта виды минерального сырья

<b>Mn</b> марганец	<b>Ti</b> титан	<b>Li</b> литий	<b>Nb</b> ниобий	<b>REE</b> Редкоземельные металлы	
<b>Y</b> иттрий	<b>La</b> лантан	<b>Ce</b> церий	<b>Pr</b> празеодим	<b>Nd</b> неодим	<b>Tm</b> тулий
<b>Sm</b> самарий	<b>Eu</b> европий	<b>Gd</b> гадолиний	<b>Tb</b> тербий	<b>Dy</b> диспрозий	<b>Ho</b> гольмий
<b>Er</b> эрбий	<b>Yb</b> иттербий	<b>Lu</b> лютеций			

**Рис. 1.** Дефицитные виды стратегического минерального сырья, определённые Минпромторгом и Минприроды России

химических характеристик отражают процессы, которые привели к образованию того или иного месторождения или металлогенических провинций. Выбор перспективной провинции — критический, наиболее ответственный шаг в стратегическом планировании мероприятий, направленных на открытие новых месторождений. Здесь возможны большие риски и финансовые потери, если на прогнозных территориях не удастся выявить крупные месторождения полезных ископаемых.

В Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН впервые после 1978 г. дана оценка состояния минерально-сырьевой базы высокотехнологичных металлов страны. Выделены генетические типы их месторождений, включая нетрадиционные для России рудные провинции и узлы (рис. 3а). Открыта новая Восточно-Саянская редкометалльная металлогеническая зона (Zr, Nb, Li, Be, REE), положение которой показано на рисунке 3 б.



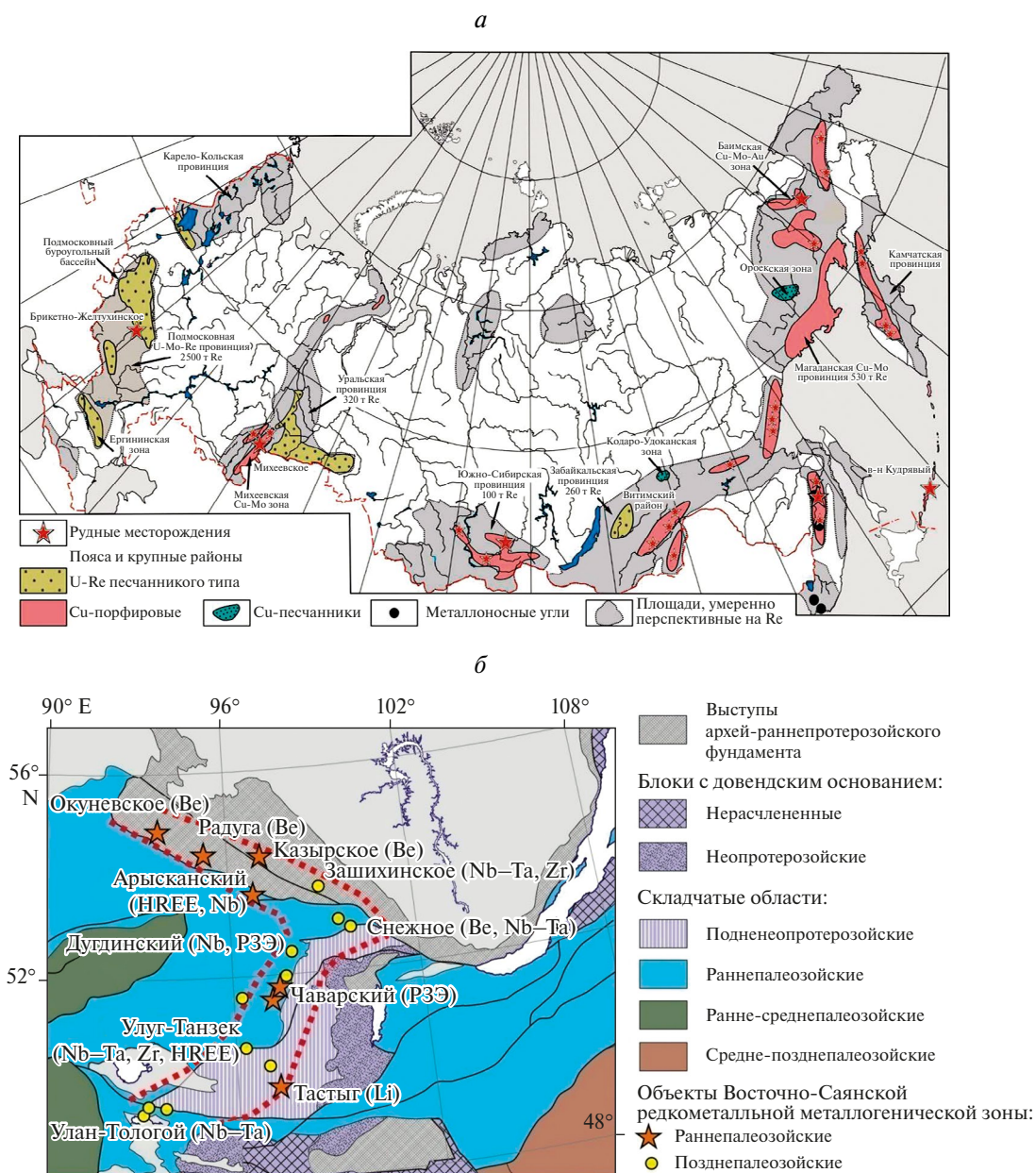
**Рис. 2.** Месторождения стратегических металлов Российской Федерации

Среди основных проблем, которые тормозят поиск, разведку и освоение месторождений, отметим следующие:

- сокращение и практическое исчерпание поискового задела по большинству стратегических видов полезных ископаемых;
- резкое сокращение государственного фонда рентабельных участков недр для их предоставления в пользование;
- новые открытия делаются в неосвоенных районах с неразвитой инфраструктурой;

- отсутствие научно обоснованных рекомендаций по концентрации имеющихся ресурсов на отдельных направлениях и территориях, здесь необходимо программно-целевое планирование;
- отсутствие необходимых организационно-финансовых условий для эффективной поисковой деятельности юниорных компаний.

РАН считает, что для преодоления перечисленных проблем необходимо существенно расширить геологоразведочные работы на Урале, в Сибири и на Дальнем Востоке, в том числе силами институтов,



**Рис. 3.** Рудные провинции и зоны Российской Федерации: *а* – карта генетических типов месторождений высокотехнологичных металлов, включая нетрадиционные для России рудные провинции и узлы; *б* – Восточно-Саянская редкометальная металлогеническая зона



находящихся под научно-методическим руководством Академии наук. Необходимо уделить особое внимание развитию отечественной аппаратурной базы для полевых и лабораторных исследований, созданию отечественного программного обеспечения по обработке и интерпретации геологических, геофизических и геохимических данных. Эта работа в настоящее время ведётся институтами РАН, отраслевыми институтами и частными компаниями, но всё перечисленное невозможно без целенаправленной государственной поддержки.

**Проблемы добычи и обогащения.** В настоящее время в России добыча рудоминерального сырья ведётся в более чем пятистах крупных карьерах и подземных рудниках, при этом на долю подземных горных работ приходится более 35%. Все крупные карьеры России и все без исключения подземные рудники относятся к объектам чрезвычайно высокого или высокого класса опасности.

Минерально-сырьевая база России претерпевает непрерывные изменения, при этом отмечаются следующие негативные тенденции.

- Вовлекаемые в эксплуатацию крупные рудные месторождения характеризуются низкосортными труднообогатимыми рудами, требующими изыскания новых способов их переработки.

- Возрастает число вовлекаемых в разработку маломасштабных месторождений, некоторые перспективные месторождения расположены в труднодоступных районах с неразвитой инфраструктурой и неблагоприятными природно-климатическими условиями.

- Проектная глубина горных работ увеличилась за последние 20 лет в среднем в 2 раза и достигла 1100 м на открытых горных работах. Глубина ведения подземных работ на железорудных месторождениях достигает 1000 м, на медноколчедановых и золоторудных – 1200 м, на медно-никелевых – более 2500 м.

- Непрерывно происходит накопление больших объёмов техногенных образований (более 100 млрд т), сопоставимых по качеству с запасами перспективных месторождений. Эти ресурсы должны быть оценены и рассматриваться в качестве составляющей минерально-сырьевой базы.

- В недрах остаётся значительная часть запасов, не извлекаемых по различным причинам [6, 7].

В Институте проблем комплексного освоения недр РАН, Горном институте Кольского научного центра РАН, Институте горного дела УрО РАН и Институте горного дела ДВО РАН ведутся комплексные научные исследования, направленные на разработку технологий селективной добычи и обогащения рудопотоков, создание отечественных аналогов технологий идентификации и сепарации руд; технологий переработки и утилизации хвостов обогащения; замкнутых схем обращения минерального вещества в недрах с выдачей на поверхность

товарной продукции; дистанционно управляемых (роботизированных) экологически приемлемых технологий добычи [6].

Базовым объектом для удовлетворения существующих потребностей отечественной промышленности в тантале, ниобии и РЗМ сегодня выступает Ловозёрское месторождение. Промышленное освоение лопаритовых руд ведётся здесь с 1939 г. Согласно распоряжению Правительства Российской Федерации № 809-р в мае 2023 г. Ловозёрский ГОК передан Госкорпорации “Росатом” (предприятие расположено за полярным кругом в центральной части Кольского полуострова).

Проблема добычи редкоземельных металлов может быть решена путём организации их извлечения из апатитовых концентратов или отходов их переработки. Напомним, что 82% запасов  $\text{TR}_2\text{O}_3$  России заключено в восьми месторождениях апатитовых руд Хибин (58%) и Селигдарского месторождения (24%). В ближайшей перспективе к ним добавится Катугинское месторождение, находящееся на стадии проектирования; вторым по очередности после завершения разведочной стадии может стать Зашихинское месторождение. По уровню разведанных запасов, прогнозных ресурсов и качеству руд перспективным для освоения представляется Томторское месторождение [8–10].

Значительные резервы таятся на рудных площадях, ранее выведенных из эксплуатации. Напомним, что уникальный рудник Умбозеро был затоплен после аварии в перестроечный период. Его расконсервация, что, конечно, представляет собой непростую задачу в плане безопасности горных работ, позволит существенно увеличить объём добычи редкоземельного сырья в достаточно короткие сроки по сравнению со строительством новых предприятий.

Как уже отмечалось, перспективы развития горнопромышленного комплекса России для обеспечения критическими металлами, в том числе редкоземельными, связаны с разработкой техногенных образований, которые слабо изучены с точки зрения добычи и глубокой переработки. Во многих случаях не ясна структура отвалов и распределение в них ценных компонентов, что затрудняет обеспечение перерабатывающих обогатительных и гидрометаллургических производств сырьём стабильного качества.

В настоящее время особое внимание следует уделить техногенным образованиям со складированным эвдиалитовым сырьём. Это потребует научно обоснованной оценки таких массивов и изыскания подходов к их безопасной отработке. В отличие от лопарита, который содержит РЗЭ лёгкой группы, эвдиалит, который до настоящего времени не перерабатывается, содержит тяжёлые РЗЭ – самарий, тербий, гадолиний, диспрозий, эрбий. Поэтому эвдиалитовый концентрат, в отличие от лопаритового, нельзя перерабатывать на единственном в стране Соликамском магниевом заводе. Если будут приня-

ты соответствующие решения, нужно строить отдельное гидрометаллургическое предприятие, которое должно предъявлять необходимые требования к качеству добываемого природного и техногенного сырья; в соответствии с ними должны разрабатываться горные технологии добычи такого сырья.

Перспективы повышения производительности действующих рудников во многом связаны с созданием в нашей в стране собственного уникального оборудования, не уступающего лучшим мировым образцам. Вопрос технического обеспечения технологий горных работ для нашей страны наиболее сложен с точки зрения достижения технологического суверенитета. В России практически не производится техника для добычи полезных ископаемых подземным способом, аппаратно-программные комплексы управления горнотехническими системами. Более того, в вузах прекращён выпуск специалистов, способных разрабатывать горные машины в соответствии с вышеотмеченными особенностями развития минерально-сырьевой базы. Отсутствуют конструкторские бюро и заводы, способные в короткие сроки восполнить пробелы в отечественном горном машиностроении. Необходимо в кратчайшие сроки совместно с соответствующими отделениями РАН и заинтересованными сторонами начать процесс возрождения российского горного машиностроения, автоматизированных систем контроля и управления технологическими процессами горного производства. Это требование относится и к оборудованию для работы в стеснённых условиях: в нашей стране не производятся погрузочно-доставочные машины с небольшой ёмкостью ковша, оборудование для крепления кровли, системы непрерывного конвейерного транспорта [11].

Для добычи урановых руд перспективен подход, предполагающий создание в недрах специальных горнотехнических конструкций на основе кислотоустойчивых материалов, так называемых камер-реакторов. В эти камеры загружается сырьё требуемой крупности, проводится выщелачивание с возможностью подачи кислорода, осуществляется циркуляция растворов и получение кондиционных для гидрометаллургического передела продуктивных растворов. В результате на поверхность выдаётся меньший объём горной массы, значительная часть отходов остаётся в недрах с возможностью консервации камер. В нашей стране не производятся оборудование и химические компоненты для технологии пастовой закладки для утилизации радиоактивных отходов при освоении урановых месторождений. Для эффективного освоения данного стратегического сырья исследования в этой области должны стать первоочередными.

Проектирование рудников для обеспечения потребности в критических металлах предполагает внедрение перспективных научно обоснованных решений на базе глубокого изучения структуры и свойств горных массивов и добываемого сырья.

Такие решения должны включать селективную отработку, внутрирудничные системы управления качеством, утилизацию пустых пород без выдачи на поверхность, утилизацию хвостов обогащения после глубокой переработки сырья в виде пастовой или иной закладки, комбинированные технологии — сочетание различных физико-технических и физико-химических способов добычи в пределах одного месторождения [6, 11].

**Проблемы обогащения и переработки руд.** Основные тенденции развития современного горно-металлургического комплекса России определяются необходимостью широкого вовлечения в переработку труднообогатимых руд и техногенного редкометалльного сырья, которые характеризуются низким содержанием ценных компонентов, тонкой вкраплённостью руд и близкими технологическими свойствами слагающих их минералов [12]. При этом эффективность процессов обогащения полезных ископаемых во многом предопределяет экономику всего горно-металлургического производства.

Проблема разделения минералов с близкими технологическими свойствами традиционно решается повышением селективности обогатительных процессов. Научные исследования в настоящее время ведутся по нескольким направлениям, включая разработку флотационных реагентов направленного действия и использование энергетических методов обработки минералов, пульп и промышленных вод. В последние годы для направленного изменения поверхностных свойств минералов активно изучается возможность использования энергетических воздействий, таких как радиационные, ультразвуковые, электрохимические, механохимические, плазменные. Если раньше эти направления рассматривались как экзотические, то в связи с началом выпуска промышленных плазмотронов, линейных ускорителей, ультразвуковых генераторов можно говорить о реальном внедрении новых экологически безопасных технологий в процессы первичной переработки труднообогатимых комплексных руд сложного вещественного состава [13–16].

Рассмотрим комплекс проблем, связанных с добычей, переработкой и обогащением руд на примере лития — одного из основных стратегических металлов. Литий находит применение в различных отраслях промышленности: чёрная и цветная металлургия (повышение пластичности, прочности металлов, сплавы с магнием, алюминием, скандием для гражданских и военных самолётов, ракетной техники), производство лёгких и высокоэффективных химических источников тока, радиоэлектроника, термоэлектрические преобразователи, монокристаллы для лазеров, медицинские препараты. Изотопы лития используются в ядерных реакторах в качестве теплоносителя, карбид лития — в термоядерной энергетике. И это далеко не все применения.

Потребление лития в мире постоянно растёт – с 70 тыс. т в 2020 г. до 93 тыс. т в 2021 г., по прогнозам оно достигнет 450 тыс. т в 2030 г. (более 2 млн т по  $Li_2CO_3$ ). В России потребление составило 1,5 тыс. т в 2021 г., прогнозы на 2030 г. – 7,5 тыс. т (35 тыс. т по  $Li_2CO_3$ ).

Разведанные общемировые ресурсы лития составляют 98 млн т. Часть их располагается в рудных месторождениях, которые содержат 30–35% разведанных запасов. Они эксплуатируются в Австралии, Канаде, Зимбабве и Финляндии, недавно открыты новые месторождения в Португалии. Другая часть – гидроминеральное сырьё, составляющее 65–70% запасов, сконцентрировано в соляных озёрах, главным образом высохших содово-щелочных озёрах – сalaraх. Основные запасы разведаны в Чили, Боливии, Аргентине, Китае.

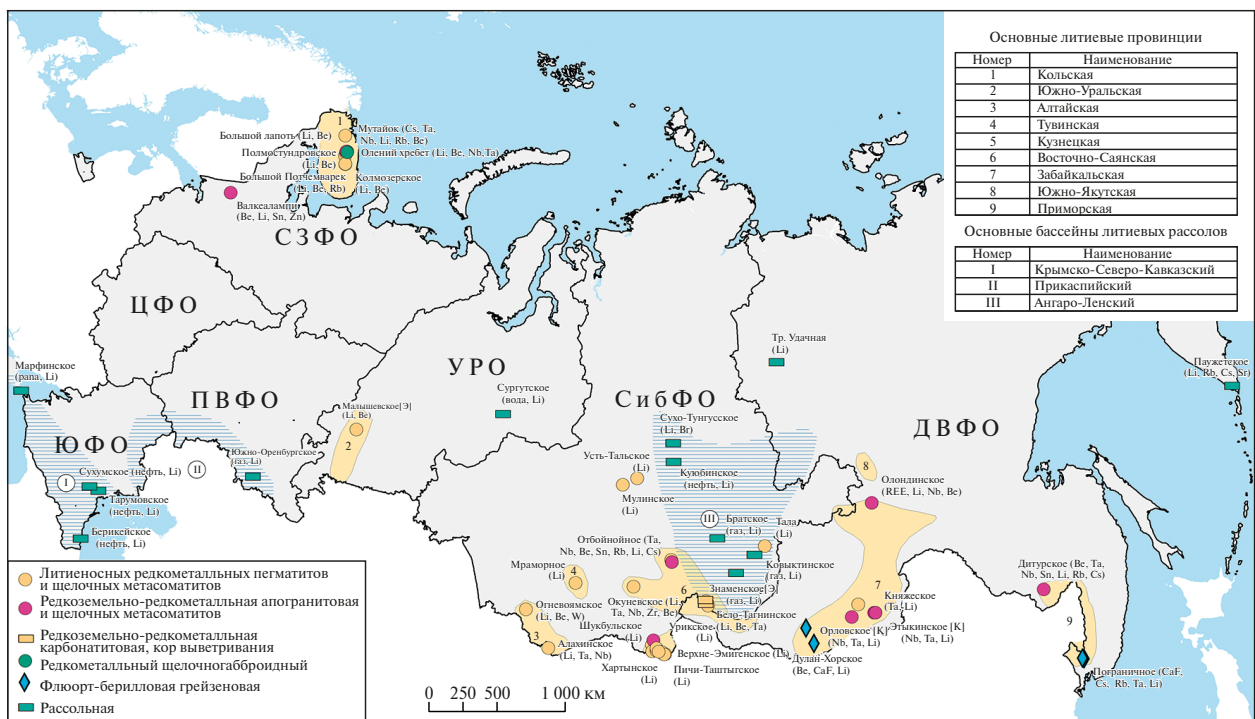
Главные провинции рудных и гидроминеральных месторождений лития в России представлены на рисунке 4. Основные запасы сосредоточены на Кольском полуострове, в Республике Тыва (руды) и в Забайкалье (гидроминеральные смеси). Весьма значительные прогнозные ресурсы лития (около 4,5 млн т категорий P1 и P2) содержатся в межпластовых рассолах кембрийских отложений Сибирской платформы [17].

В целом спрос на литий в России, по экспертным оценкам, в настоящее время минимален, этот металл востребован атомной отраслью и ВПК.

Учитывая, что производство лития – процесс энергоёмкий, а электроэнергия в нашей стране значительно дешевле, чем в Европе и США, себестоимость отечественного металла будет экономически привлекательна. Карбонат лития собственного производства планируется получить в России через 2–3 года.

В Институте химии твёрдого тела и механохимии СО РАН ещё в 1950-х годах была разработана комплексная технология переработки сподуменового концентрата – источника лития (руководитель работ доктор технических наук И.С. Лилеев). Созданная технология использовалась для получения отечественного лития – был построен Красноярский химико-металлургический завод, который поставлял продукт на Новосибирский завод химических концентратов, где и производили металлический литий батарейного качества и его соединения. В настоящее время завод работает исключительно на импортном сырьё.

Для переработки литиевых руд и концентратов традиционно используют четыре способа: сульфатный, известковый, серноокислотный и хлорирующий обжиг. Сульфатный способ, основанный на спекании литиевых руд и концентратов с сульфатом калия, сопряжён со значительным расходом дорогостоящего сульфата калия. Этот способ применялся в промышленном масштабе при переработке литиевых слюд: лепидолита и цинвальдита. Известковый



**Рис. 4.** Главные провинции рудных и гидроминеральных месторождений лития в России. Основные рудные запасы сосредоточены на Кольском полуострове и в Республике Тыва, гидроминеральные смеси – в Забайкалье



способ предполагает спекание с известью с последующим разложением спека водой; образующийся при выщелачивании спека гидроксид лития кристаллизуется из раствора после многостадийного упаривания. К преимуществам этого способа относится возможность прямого получения гидроксида лития, но нельзя не учитывать и серьёзные недостатки. Известковый способ применим в большей степени к богатым литиевым концентратам, однако и в этом случае извлечение в готовый продукт не превышает 70%, что обусловлено ограниченной растворимостью гидроксида лития и способностью шламов после выщелачивания к схватыванию. Другой недостаток – необходимость выпаривания больших объёмов растворов.

Разложение серной кислотой (серноокислотный способ) используют для литиевых концентратов всех типов: сподуменовых, лепидолитовых и амблигонитовых. Серноокислотный способ обеспечивает извлечение 80% лития и превосходит все другие технологические процессы. Однако серноокислотная технология сопряжена с рядом нежелательных последствий, в том числе экологических. Ресурсосберегающий аналог этого процесса предложен членом-корреспондентом РАН Р.Х. Хамизовым (Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН). Преимущество процесса в том, что при выщелачивании вместо серной кислоты используется бисульфат аммония, к тому же при разложении сподумена осуществляется регенерация реагента.

В лабораторных условиях продемонстрированы возможности извлечения лития из рудного и гидроминерального сырья с помощью разработанных в Институте геохимии и аналитической химии РАН замкнутых ресурсосберегающих процессов, позволяющих многократно снизить расход реагента и удерживать сорбционные материалы в технологических циклах. Для продвижения технологии необходимы дальнейшие исследования на опытно-промышленных установках, но их создание не профинансировано. Между тем новая технология могла бы найти применение при переработке руд Колмозёрского пегматитового месторождения на Кольском полуострове, объём добычи на котором должен достигнуть 45 тыс. т продукции в год.

Для селективного выделения лития из гидроминеральных смесей применяются методы экстракционные, сорбционные и селективного осаждения. По всем направлениям имеются инновационные разработки институтов РАН. Так, коллективом Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН под руководством академика РАН А.Ю. Цивадзе разработан экстракционный способ извлечения лития на основе новых литий-селективных экстрагентов [18]. По структуре они подобны известным 1,3-дикетонам, однако имеют большую эффективность и меньшую стоимость. Разработанный способ обладает крайне высокой Li/Na, Li/K

селективностью и демонстрирует очень высокие коэффициенты распределения лития даже в разбавленных растворах. Способ применим для извлечения лития из руд, рассолов и техногенных отходов. Его апробация также требует создания опытно-промышленной установки.

В 2012 г. в Китае запущено предприятие по выпуску около 10 тыс. т карбоната лития в год с использованием технологии, основанной на разработках Института химии твёрдого тела и механохимии СО РАН [19, 20] и реализованной ООО “Экостар-Наутех” (доктор химических наук Н.П. Коцупало и доктор технических наук А.Д. Рябцев, г. Новосибирск). Ранее, в 2004 г., прошли успешные испытания высокоселективного сорбента ДГАЛ-С1 на китайских рассолах компанией из КНР. Освоен промышленный процесс получения карбоната лития из рассолов озера Дабсан-Нур (провинция Цинхай, КНР). Для реализации этой технологии на российских предприятиях Институт химии твёрдого тела и механохимии СО РАН предложил улучшить технологическую схему путём организации сорбционных процессов на порошковом сорбенте с использованием пульсационных колонн – вместо грануляций сорбента ДГАЛ-С1. Применение пульсационных противоточных колонн обеспечивает высокотурбулентное движение раствора и порошкового ДГАЛ-С1, чем снимаются внешние диффузионные ограничения и достигается полнота извлечения лития из рассолов.

**Проблемы добычи редкоземельных элементов.** На территории Российской Федерации разведано более 90 месторождений РЗЭ (рис. 5). Рудопрооявления зафиксированы в более чем 70 районах. РЗЭ включают 17 химических элементов, из которых сейчас наиболее востребованы диспрозий, неодим, празеодим (в производстве магнитов для транспорта). По ресурсам и резервам редкоземельных элементов Россия делит 2–3 место с Бразилией, уступая только Китаю.

Хотя известно более 200 минералов, содержащих РЗЭ, но добываются для их извлечения только четыре: бастнезит, лопарит, монацит и ксенотим. Для большинства редкоземельных элементов в России нет технологий извлечения, недостаточно изучены физические свойства минералов. В нашей стране разрабатываются два месторождения РЗЭ: Ловозеро, из его лопаритовых руд извлекаются металлы; в хибинских месторождениях РЗЭ содержатся в апатите, из него получают удобрения, а редкоземельные элементы уходят в хвосты. В 2021 г. Китай добыл 168 тыс. т, а Россия – 117,7 тыс. т руд РЗМ. Но из добытого в нашей стране только 2,5 тыс. т лопаритовых руд идёт в переработку.

Институты РАН активно разрабатывают технологии переработки руд Кольского региона (в числе его преимуществ – достаточно развитая инфраструктура и транспортная доступность) [13]. В Ин-

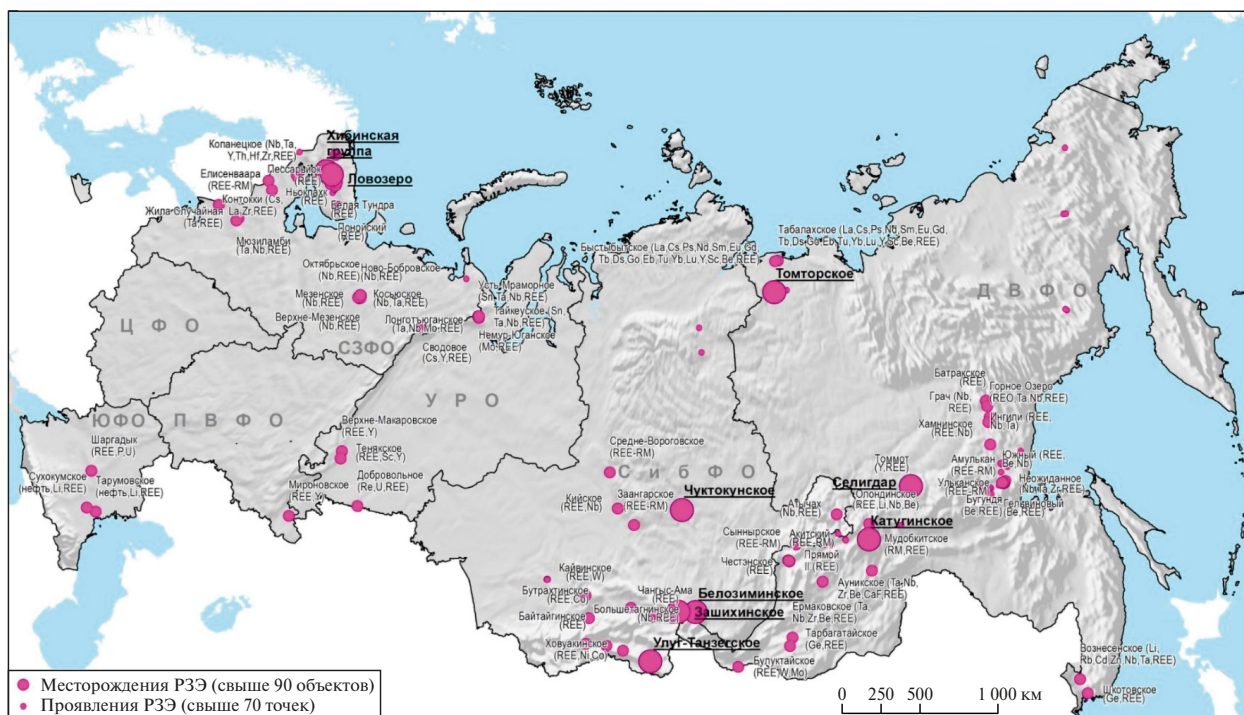


Рис. 5. Основные месторождения редкоземельных элементов в Российской Федерации

ституте проблем комплексного освоения недр РАН предложена технология переработки эвдиалитовых руд [13]. Производство  $TiO_2$  для титан-содержащих продуктов из техногенных отходов обогащения апатито-нефелиновой руды разработано в Институте химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева Кольского научно-центра РАН. Этим институтом, а также Государственным научно-исследовательским и проектным институтом редкометаллической промышленности и Ведущим научно-исследовательским институтом химической технологии (оба в составе ГК «Росатом») предложен совместный проект переработки колмозерского сподумена, с получением карбоната лития на пилотной площадке в г. Апатиты.

Следует также отметить, что наиболее быстрыми темпами самообеспечение по ряду импортозависимых видов минерального сырья (Ti, Nb, REE, Ta, Zr) может быть достигнуто за счёт освоения россыпных месторождений, преимущества которых по сравнению с коренными месторождениями заключаются, во-первых, в относительно неглубоком залегании промышленного пласта (десятки метров), что позволяет проводить отработку в открытом карьере; во-вторых, для глубокозалегающих россыпей возможно применение метода скважинной гидродобычи, по эффективности сопоставимого с открытой отработкой; в-третьих, процессы обогащения, преимущественно гравитационного, технологически просты; в-четвёртых, процессы обогащения энергетически эффективны, исклю-

чают дробление материала, на которое уходит 50% энергетических затрат при разработке коренных месторождений; в-пятых, средства, вложенные в добычу россыпей, быстро начинают отдачу, часто в течение одного сезона.

В Томторском и Чукотском месторождениях сосредоточено около 80% запасов богатых руд России по редкоземельным металлам и ниобию [17], однако предварительное их обогащение современными методами не представляется возможным. Это обусловлено ультрадисперсностью минеральных составляющих и их тонким взаимным прорастанием [13]. Общие ресурсы Томторского месторождения колоссальны. По современным оценкам запасы составляют 73.6 млн т  $Nb_2O_5$ , 153.7 млн т  $TR_2O_3$ , около 2 млрд т  $P_2O_5$ . По ресурсам редких и редкоземельных металлов и их концентрациям Томторское месторождение – безусловный лидер нашей планеты. Чукотское рудное месторождение, расположенное в Красноярском крае, в 120 км от г. Кодинска, – уникальный редкометалльный объект России, содержащий наряду с редкоземельными металлами ниобий и ряд других ценных металлов.

Однако освоение этих месторождений затруднено в связи с их удалённостью, сложными географическими условиями, вечной мерзлотой, отсутствием инфраструктуры, в том числе дорог и энергоснабжения. В настоящее время выполняется большой цикл исследований по комплексной переработке руд этих месторождений [21, 22]. Исследования по усовершенствованию процесса глубокого обога-

щения руды Томторского месторождения (участок Южный и Северный) ведутся во Всероссийском научно-исследовательском институте минерального сырья им. Н.М. Федоровского. В Институте химии и химической технологии СО РАН разработана уникальная технология переработки томторских руд. В полезную переработку вовлекается 75% компонентов руды, в результате чего отсутствует необходимость в её предварительном обогащении.

**Выводы и рекомендации.** Резюмируя, необходимо ещё раз подчеркнуть: достижение технологического суверенитета России – наиболее актуальной на сегодня государственной задачи – неосуществимо без прочной опоры на отечественное минеральное сырьё.

В целях исполнения поручения Президента Российской Федерации от 28 июня 2022 г. № Пр-1130 Российская академия наук считает необходимым ускорить разработку и реализацию федеральной научно-технической программы “Развитие минерально-сырьевой базы на основе технологий прогноза, поисков, геологоразведки, добычи и обогащения руд стратегических металлов и их извлечения для обеспечения высокотехнологичной промышленности Российской Федерации”. Программа предусматривает не только создание технологий от стадии прогноза и поисков месторождений до глубокой переработки высокотехнологичных видов сырья, но и разработку и запуск производства отечественного оборудования, подготовку кадров и, что не менее важно, формирование и развитие устойчивого поступательно растущего внутреннего спроса на получаемую продукцию высоких переделов. В ходе реализации программы должен осуществляться постоянный мониторинг актуальности включённых в неё работ и мероприятий, уточнение приоритетов развития минерально-сырьевой базы полезных ископаемых в увязке с прогнозом научно-технологического развития России, комплексное научно-техническое сопровождение геологоразведочных работ, добычи и промышленной переработки твёрдых полезных ископаемых, а также ускоренное замещение импортных технологий и оборудования российскими аналогами.

Российская академия наук призвана объединить исследования ведущих научных и производственных организаций по следующим направлениям:

- разработка отечественной аппаратуры для полевых и лабораторных геологических, геохимических и геофизических исследований, в том числе для поиска и разведки скрытых, глубокозалегающих, нетрадиционных и техногенных месторождений металлов и иных видов стратегического минерального сырья;
- расширение работ по поискам и разведке новых месторождений на Урале, в Сибири и на Дальнем Востоке с особым вниманием к слабо изученным арктическим регионам;

- разработка и обеспечение промышленного производства отечественного оборудования для проведения подземных работ, в том числе в стеснённых условиях и с применением безлюдных технологий;

- разработка новых технологий добычи, аппаратно-программных комплексов управления горнотехническими системами, в том числе замкнутых схем обращения минерального вещества в недрах с выдачей на поверхность только товарной продукции;

- создание экологически безопасных технологий извлечения стратегических металлов из комплексных руд сложного вещественного состава, выделения ценного сырья из гидроминеральных и техногенных источников;

- создание и промышленное производство высокоэффективных отечественных флотореагентов, экстрагентов и сорбентов для их применения в технологиях обогащения и селективного извлечения стратегических металлов, а также нового отечественного оборудования для предконцентрации и обогащения (дробилки ударного действия, тяжелосредные сепараторы, флотационные машины и др.);

- создание опытно-промышленных обогатительных установок для апробации инновационных технологий обогащения, разделения и извлечения стратегических металлов, разработанных в процессе проведения опытно-конструкторских работ.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность академикам РАН Н.С. Бортникову, В.Н. Захарову, Л.И. Леонтьеву, Н.П. Похиленко, А.Ю. Цивадзе, В.А. Чантурия, членам-корреспондентам РАН Т.Н. Александровой, А.В. Волкову, А.П. Немудрому, И.Г. Тананаеву, Р.Х. Хамизову, доктору геолого-минералогических наук А.В. Лаломову, доктору химических наук О.П. Таган за предоставленные материалы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Бортников Н.С., Лобанов К.В., Волков А.В. и др.* Месторождения стратегических металлов арктической зоны // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 6. С. 479–500.  
*Bortnikov N.S., Lobanov K.V., Volkov A.V. et al.* Strategic metal deposits of the Arctic Zone // *Geology of ore deposits.* 2015. V. 57. № 6. P. 433–453.
2. *Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л. и др.* Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58. № 2. С. 97–119.  
*Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyamov A.L. et al.* Mineral resources of high-tech metals in Russia: State of the art and outlook // *Geology of ore deposits.* 2016. V. 58. № 2. P. 83–103.



3. *Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л. и др.* Фундаментальные проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологической промышленности и энергетики России // Геология рудных месторождений. 2022. Т. 64. № 6. С. 617–633.  
*Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyatov A.L. et al.* Fundamental Problems of Development of the Mineral-Resource Base of High-Tech Industry and Energy of Russia // *Geology of ore deposits*. 2022. V. 64. № 6. P. 313–328.
4. *Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л. и др.* Проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологической промышленности России // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 5. С. 371–386.  
*Bortnikov N.S., Volkov A.V., Galyatov A.L. et al.* Problems of development of the mineral resource base of the high-tech industry of Russia // *Geology of ore deposits*. 2023. V. 65. № 5. P. 397–411.
5. *Бортников Н.С., Лаломов А.В., Волков А.В., Бошнева А.А.* Роль россыпных месторождений в обеспечении воспроизводства минерально-сырьевой базы дефицитных видов стратегического минерального сырья России на современном этапе. 2024 // *Russian Journal of Earth Science*. 2024. № 1 DOI: 10.2205/2024es000897  
*Bortnikov N.S., Lalomov A.V., Volkov A.V., Bozhneva A.A.* The role of alluvial deposits in ensuring the reproduction of the mineral resource base of scarce types of strategic mineral raw materials in Russia at the present stage // *Russian Journal of Earth Science*. 2024. № 1. DOI: 10.2205/2024es000897
6. *Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н.* Принципы проектирования и выбор технологии освоения недр, обеспечивающих устойчивое развитие подземных рудников // *Горный журнал*. 2017. № 11. С. 52–59. DOI: 10.17580/gzh.2017.11.10  
*Kaplunov D.R., Radchenko D.N.* Design philosophy and choice of technologies for sustainable development of underground mines // *Gornyi Zhurnal*. 2017. № 11. P. 52–59. DOI: 10.17580/gzh.2017.11.10
7. *Каплунов Д.Р., Федотенко В.С.* Устойчивое развитие горнотехнических систем как переход от добычи полезных ископаемых к освоению георесурсов и сохранению недр // *Горный журнал*. 2021. № 8. С. 4–7. DOI:10.17580/gzh.2021.08.01  
*Kaplunov D.R., Fedotenko V.S.* Sustainable advancement in geotechnical engineering as transition from mineral mining to development and preservation of natural resources // *Gornyi Zhurnal*. 2021. № 8. P. 4–7. DOI:10.17580/gzh.2021.08.01
8. *Похиленко Н.П., Толстов А.В.* Перспективы освоения Томторского месторождения комплексных ниобий-редкоземельных руд // ЭКО – Всероссийский экономический журнал. 2012. № 11. С. 17–27.  
*Pokhilenko N., Tolstov A.* Prospects for the development of the Tomtorskoye deposit of complex niobium-rare earth ores // *ECO – All-Russian Economic Journal*. 2012. № 11. P. 17–27.
9. *Похиленко Н.П., Крюков В.А., Толстов А.В., Самсонов Н.Ю.* Томтор как приоритетный инвестиционный проект обеспечения России собственным источником редкоземельных элементов // ЭКО – Всероссийский экономический журнал. 2014. № 2. С. 22–35.  
*Pokhilenko N., Kryukov V., Tolstov A., Samsonov N.* Tomtor as Priority Investment Project to Provide Russia with its own Source of Rare Earth Elements // *ECO – All-Russian Economic Journal*. 2014. № 2. P. 22–35.
10. *Толстов А.В., Похиленко Н.П., Лапин А.В. и др.* Инвестиционная привлекательность Томторского месторождения и перспективы её повышения // Разведка и охрана недр. 2014. № 9. С. 25–30.  
*Tolstov A.V., Pokhilenko N.P., Lapin A.V. et al.* Investment appeal of Tomtor deposit and prospect of its increase // *Prospect and protection of mineral resources*. 2014. № 9. P. 25–30.
11. *Захаров В.Н., Гвишиани А.Д., Вайсберг Л.А., Дзеранов Б.В.* Большие данные и устойчивое функционирование горнотехнических систем // Горный журнал. 2021. № 11. С. 45–52. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.06  
*Zakharov V.N., Gvishiani A.D., Vaisberg L.A., Dzeranov B.V.* Big Data and sustainable functioning of geotechnical systems // *Gornyi Zhurnal*. 2021. № 11. P. 45–52. DOI: 10.17580/gzh.2021.11.06
12. *Леонтьев Л.И., Заякин О.В., Волков А.И.* Проблемы развития металлургической отрасли для обеспечения технологического суверенитета России с учётом состояния минерально-сырьевой базы // Вестник РАН. 2023. Т. 93. № 7. С. 631–645.  
*Leontiev L.I., Zayakin O.V., Volkov A.I.* Problems of development of the metallurgical industry to ensure the technological sovereignty of Russia, accounting the state of the mineral resource base // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2023. V. 93. № 7. P. 631–645.
13. *Чантурия В.А.* Научное обоснование и разработка инновационных процессов комплексной переработки минерального сырья // Горный журнал. 2017. № 11. С. 7–13. DOI:10.17580/gzh.2017.11.01.  
*Chanturia V.A.* Scientific substantiation and development of innovative approaches to integrated mineral processing // *Gornyi Zhurnal*. 2017. № 11. P. 7–13. DOI:10.17580/gzh.2017.11.01
14. *Чантурия В.А., Николаев А.И., Александрова Т.Н.* Инновационные экологически безопасные процессы извлечения редких и редкоземельных элементов из комплексных руд сложного вещественного состава // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 5. С. 402–415. DOI:10.31857/S0016777023050040

- Chanturia V.A., Nikolaev A.I., Aleksandrova T.N.* Innovative Environmentally Safe Processes for the Extraction of Rare and Rare-Earth Elements from Complex Ores of Perplexed Material Composition // *Geology of ore deposits*. 2023. V. 65. № 5. P. 425–437
15. *Aleksandrova T., Nikolaeva N., Afanasova A. et al.* Extraction of Low-Dimensional Structures of Noble and Rare Metals from Carbonaceous Ores Using Low-Temperature and Energy Impacts at Succeeding Stages of Raw Material Transformation // *Minerals*. 2023. V. 13. № 1. P. 84. <https://doi.org/10.3390/min13010084>
- Александрова Т.Н., Прохорова Е.О.* Модификация свойств породообразующих минералов при флотации // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023. № 12. С. 123–138. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_12\_0\_123.
16. *Aleksandrova T.N., Prokhorova E.O.* Modification of properties of rock-forming minerals during flotation // *Mining informational and analytical bulletin*. 2023. № 12. P. 123–138. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_12\_0\_123
17. *Похиленко Н.П., Афанасьев В.П., Толстов А.В. и др.* Перспективы развития и проблемы освоения сырьевой базы дефицитных стратегических видов твёрдых полезных ископаемых Сибири // *Геология рудных месторождений*. 2023. Т. 63. № 5. С. 476–492.
- Pokhilenko N.P., Afanasiev 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. V. 63. № 5. P. 476–492.
18. *Цивадзе А.Ю., Баулин В.Е., Костикова Г.В. и др.* Селективное извлечение лития из минерального, гидроминерального и вторичного сырья // *Вестник РАН*. 2023. № 7. С. 623–630.
- Tsivadze A.Yu., Baulin V.E., Kostikova G.V. et al.* Selective extraction of lithium from mineral, hydromineral and secondary raw materials // *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2023. № 7. P. 623–630.
19. *Немудрый А.П., Исупов В.П., Коцупало Н.П., Болдырев В.В.* Взаимодействие кристаллического гидроксида алюминия с водными растворами солей лития. 2. К вопросу о механизме взаимодействия гидраргиллита с водными растворами хлорида лития // *Изв. СО АН СССР. Сер. хим. наук*. 1984. Вып. 5. С. 47–51.
- Nemudry A.P., Isupov V.P., Kotsupalo N.P., Boldyrev V.V.* Interaction of crystalline aluminum hydroxide with aqueous solutions of lithium salts. 2. On the question of the mechanism of interaction of hydrargillite with aqueous solutions of lithium chloride // *Izv. Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. Ser. chem. Sci.* 1984. V. 5. P. 47–51.
20. *Isupov V.P., Kotsupalo N.P., Nemudry A.P., Menzeres L.T.* Aluminium hydroxide as selective sorbent of lithium salts from brines and technical solutions // *Stud. Surf. Sci. Catal.* 1999. V. 120(A). P. 621–652. [https://doi.org/10.1016/s0167-2991\(99\)80567-9](https://doi.org/10.1016/s0167-2991(99)80567-9)
21. *Serdyuk S.S., Lomayev V.G., Kuzmin V.I. et al.* The Chuktukon niobium-rare earth metals deposit: Geology and investigation into the processing options of the ores // *Minerals Engineering*. 2017. V. 113. November. P. 8–14.
22. *Kuzmin V.I., Flett D.S., Kuzmina V.N. et al.* The composition, chemical properties, and processing of the unique niobium-rare earth ores of the Tomtor deposit // *Chemical Papers*. 2019. V. 73. Is. 6. P. 1437–1446. DOI: 10.1007/s11696-019-00695-z

# CRITICAL TECHNOLOGIES FOR THE DEVELOPMENT OF BASE OF THE MINERAL RESOURCES OF THE RUSSIAN FEDERATION: FROM FORECASTING AND ORE MINING TO METAL EXTRACTION AND THE CREATION OF HIGH-TECH PRODUCTS

**S.M. Aldoshin<sup>a,\*</sup>**

<sup>a</sup>*Russian academy of sciences*

<sup>\*</sup>*E-mail: sma@icp.ac.ru*

The current state of the mineral resource base of Russia, the issues of achieving import independence in providing Russian industry with strategic metals are considered. The problems of prospecting and exploration of ores of such metals, their enrichment and extraction are discussed. Solutions to some of the identified problems proposed by the Russian Academy of Sciences are presented. Considerable attention is paid to the mining and extraction of lithium and rare earth elements.

The article is based on a report at the scientific session of the General Meeting of Members of the Russian Academy of Sciences on December 12, 2023, using materials from a joint meeting of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on Materials and Nanomaterials, the Interdepartmental Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on the development of the mineral resource base and its rational use, the bureau of the Department of Chemistry and Material Sciences of the Russian Academy of Sciences, the Bureau of the Department of Geosciences of the Russian Academy of Sciences and with the participation of representatives of the State Corporation “Rosatom”, the Ministry of Industry and Trade of Russia and the Ministry of Education and Science of Russia.

*Keywords:* mineral resource base, strategic metals, import independence, lithium, rare earth elements.