

сал приказ о присвоении ему звания Героя Российской Федерации уже после смерти Алексея Михайловича.

Отец публиковал свои воспоминания, причем были моменты, которые частично вошли, а может быть, и нет, в те воспоминания, которые были опубликованы. Было несколько таких очень интересных моментов, о которых он любил рассказывать. Вспоминается вот такой: это — как на мелководье была уничтожена немецкая подводная лодка. На этой лодке были какие-то очень секретные мины последних разработок, которыми чрезвычайно заинтересовалось военное командование Великобритании, когда узнало, что советские военные получили доступ к ним. Об этом подробно рассказывается выше.

Еще очень интересный был момент. Эта подводная лодка «Лембит» произвела, наверное, случайный, единственный известный за всю историю флота подводный таран. Она столкнулась с немецкой подводной лодкой, которая там же, у побережья Балтики, очевидно, лежала в дрейфе, а может быть, и стояла в засаде. Это — официальная версия события, которую можно прочитать в литературе. Есть даже споры по поводу того, был ли это подводный таран или нет. Но, тем не менее, такой вот факт был.

А так, в общем, в советское время, помимо встреч ветеранов, отец ездил в Таллин. Уже, наверное, в конце семидесятых — в восьмидесятые годы лодка была установлена там на вечную стоянку. Насколько я знаю, сейчас она существует как музей, но все упоминания о советском периоде, в том числе об экипаже, который служил на этой лодке во время войны, убранны отсюда. Поскольку лодка была построена в Англии для военно-морского флота буржуазной Эстонии еще до вхождения страны в Советский Союз, то сейчас там, я думаю, содержатся данные только о тех моряках, которые служили на лодке до советского периода эстонской истории.

Отец переписывался с детьми, с пионерами. Он постоянно получал поздравления, причем, со всего Советского Союза, а не только из Эстонии. Даже с Дальнего Востока какие-то открытки приходили. В последние годы жизни, уже будучи на пенсии, он много и с интересом работал в Совете ветеранов Бабушкинского района Москвы. Еще он часто встречался с А.М. Матиясевичем по ветеранским делам.

Не могу не упомянуть о связи отца с ВИМСом, институтом, в котором он проработал большую часть своей послевоенной жизни. Он, пока было здоровье, обязательно приходил туда на празднование Дня победы, а уж с друзьями перезванивался до последних дней. Наверное, вот в основном, и все.

Да, добавлю еще один интересный момент о благородстве командира Матиясевича. Отец, будучи еще совсем молодым человеком, и до конца, не понимая общую обстановку в стране и в армии, переписывался со своим другом, который тоже служил в действующей армии. В своей переписке они стали затрагивать политические вопросы, начали критиковать командование, и, в том числе, дошли до личности генералиссимуса

Иосифа Виссарионовича Сталина. Не знаю, был ли на лодке штатный особист, но, по крайней мере, это письмо попало к командиру. И он, надо отдать должное, абсолютно никакого хода этому письму не дал. Он вызвал отца и по-русски объяснил ему, к чему такая переписка может привести. Вот такое небольшое дополнение к воспоминаниям.

На фронтах Великой Отечественной войны воевали 194 сотрудника ВИМСа, 26 из которых погибли в боях за Родину, 95 человек получили ранения и контузии. Награждены: орденами Красного Знамени — 4, Красной Звезды — 52, Отечественной войны — 76, Славы — 6, Богдана Хмельницкого — 1; медалями за отвагу — 28 человек, за боевые заслуги — 24 человека.

После войны 9 фронтовиков стали лауреатами Ленинской и Государственной премий, 4 — награждены Орденом Ленина, 11 — Орденом Знак Почета.

© Антоненко Л.А., 2020

Антоненко Людмила Александровна // antonenkol@yandex.ru

УДК 553.04:553.493.6+553.623.5+621.31

**Машковцев Г.А., Быховский Л.З., Онтеева Т.Д.
(ФГБУ «ВИМС»)**

МИНЕРАЛЬНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ МЕТАЛЛОВ ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

*В статье анализируются причины повышения востребованности ряда редких (Li, Nb, Ta, Be, TR, Sc, Re) и цветных (Ni, Co) металлов в условиях развития новых технических средств и направлений, таких как «зеленая» энергетика (ветровые и солнечные электростанции), аккумуляторы и системы накопления и хранения энергии. В связи с этим возрастает потребность в расширении минерально-сырьевой базы металлов для высоких технологий, в т.ч. «батареи металлов». Рассмотрено современное состояние мировой минерально-сырьевой базы за рубежом и особенно российской. **Ключевые слова:** «зеленая» энергетика, «батареи металлы», литий, редкоземельные металлы, тантал, ниобий, никель, кобальт, бериллий, скандий, рений, минерально-сырьевая база.*

Mashkovtsev G.A., Bykhovskiy L.Z., Ontoeva T.D. (VIMS)

MINERAL MATERIALS FOR METALS HIGH TECHNOLOGIES

The article analyzes the reasons for the increasing demand for a number of rare (Li, Nb, Ta, Be, TR, Sc, Re) and non-ferrous (Ni, Co) metals in the context of the development of new technical means and directions, such as green energy (wind and solar power plants), batteries and energy storage and storage systems. In this regard, there is an increasing need to expand the mineral resource base of metals for high technologies, including «battery metals». The current state of

the world mineral raw materials base abroad and especially Russian. Keywords: «green» energy, «battery» metals, lithium, rare-earth metals, tantalum, niobium, nickel, cobalt, beryllium, scandium, rhenium, mineral resource base.

В последние десятилетия мировая экономика и промышленность активно переходит на создание и эксплуатацию новых технических средств и материалов для высоких технологий в области энергетики, в т.ч. атомной, электроники, аэрокосмических, военно-технических и других производств, что обуславливает повышение востребованности ряда редких (Li, Nb, Ta, Be, Tr, Sc, Re) и цветных металлов (Ni, Co) [8].

В настоящее время в мире активно развиваются новые направления в производстве и использовании альтернативных источников электроэнергии (ЭЭ) — ветровых и солнечных электростанций, энергосберегающих технологий — электромобилей, системного энергообеспечения умных домов и др. Для накопления и последующего использования электроэнергии требуются аккумуляторы и батареи нового поколения, главной особенностью которых является большая емкость, возможность длительного хранения ЭЭ, долгосрочное использование со значительным циклом зарядки-разрядки.

Новые накопители ЭЭ используют «батарейные» материалы с Li, Co, Ni, что вызывает существенный рост в потребности соответствующего минерального сырья. Наиболее часто применяются аккумуляторы на основе лития: литий-железо-сульфидный, литий-ионный, литий-полимерный. В настоящее время в массовом

производстве литий-ионных аккумуляторов используются катодные материалы на основе твердых растворов кобальтата лития (LiCoO_2) или изоструктурного никелата лития (NiCoO_2), а также из феррофосфата лития (LiFePO_4) и литий-марганцевой шпинели (LiMn_2O_4). Благодаря низкому саморазряду и большому количеству циклов зарядки/разрядки, литий-ионные аккумуляторы наиболее предпочтительны для применения в альтернативной энергетике. Литий-ионные аккумуляторы различаются по типу используемого катодного материала. Переносчиком заряда в литий-ионном аккумуляторе является положительно заряженный ион лития, который имеет способность внедряться в кристаллическую решетку других материалов (например, в графит, окислы и соли металлов) с образованием химической связи, например, в графит с образованием LiC_6 , в оксиды (LiMn_mO_n) и соли металлов (LiMn_mO_n) (рисунок).

Наиболее востребованным является **литиевое минеральное сырье**.

В 2015 г. мировой объем продаж батарей составил 170 тыс. т, а уже в 2020 г. вырастет до 420 тыс. т. Извлекаемые запасы Li_2O в мире составляют 14,5 млн т [22], при этом подавляющая часть подтвержденных запасов (78 %) учитывается в литийсодержащей рапе соляных озер, где литий присутствует в виде различных соединений (в основном сульфатов и хлоридов). С редкометалльными пегматитами связано около 23 % запасов лития. Лидером по запасам литиевого сырья является Чили, где сосредоточено 52 % запасов лития, представленных наиболее дешевыми для освоения гидроминеральными месторождениями. На втором

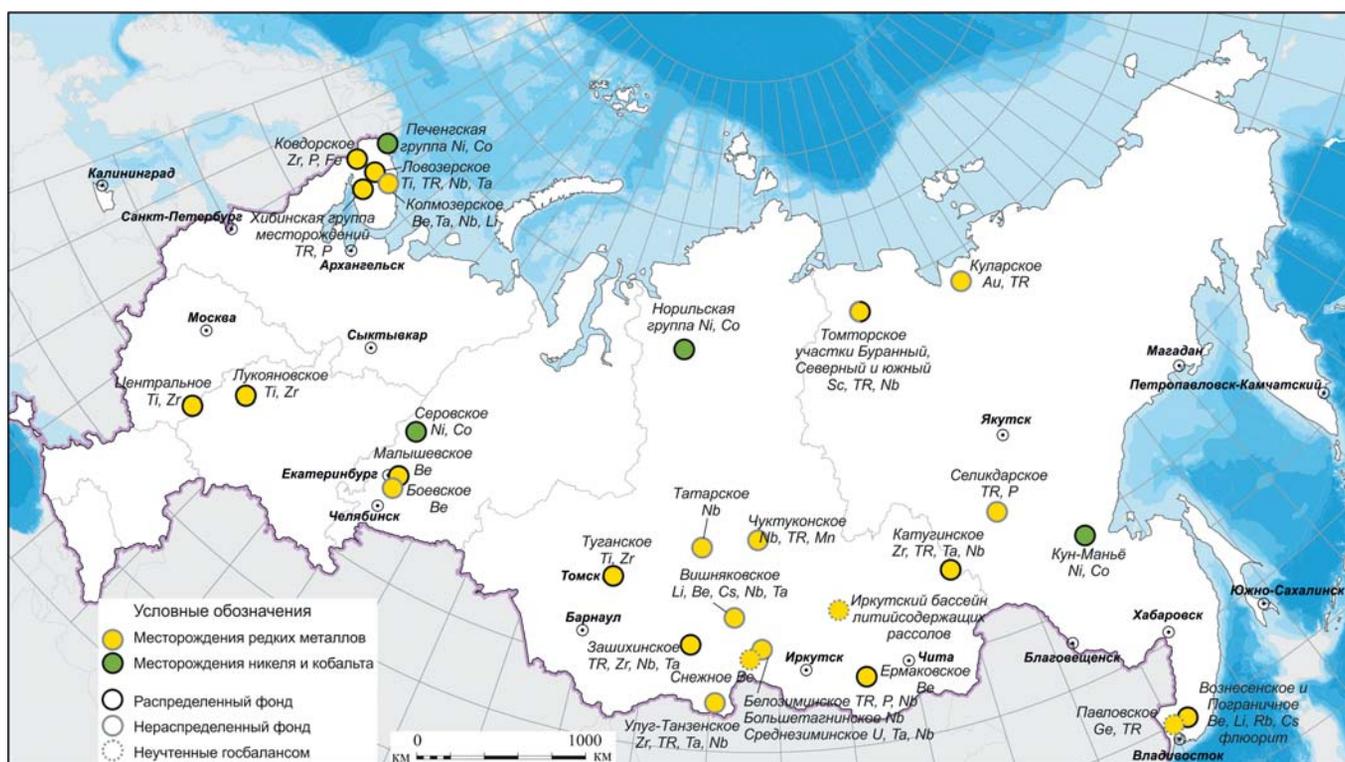


Рис. 1. Схема размещения основных месторождений металлов для высоких технологий на территории России

Таблица 1
Основные зарубежные месторождения лития

Наименование	Запасы, млн т	Содержание Li ₂ O, %	Содержание попутных компонентов	Производство концентрата, тыс. т
Рудные (пегматиты)				
Гринбушес, Австралия	120,6	2,6	Nb ₂ O ₃ — 230 г/т Ta ₂ O ₅ — 260 г/т	180
Пилгангура, Австралия	213,0	1,32	Ta ₂ O ₅ — 116 г/т	160
Квебек Литиум, Канада	17,1	1,76	Nb, Ta	213
Цзяцзика, Китай	80,5	1,34		20
Гидроминеральные (рассолы, рапа)				
Атакама, Чили	6,2	0,3	B — 0,003 %	Li ₂ CO ₃ — 48 LiOH — 6
Омбрэ-Муэрто, Аргентина	0,8	0,1	B — 0,03 %	Li ₂ CO ₃ — 22,5
Ринкон, Аргентина	0,53	0,04	Mg — B — 0,03 %	Li ₂ CO ₃ — 1,5
Уюни, Боливия	10,2*	0,05	Mg < 0,01	Li ₂ CO ₃ — 0,02
Цзабуе, Китай	1,5	0,2		Li ₂ CO ₃ — 17

* прогнозные ресурсы

Таблица 2
Основные месторождения лития России

Наименование	Доля в МСБ РФ	Содержание Li ₂ O, %	Попутные компоненты
Рудные (пегматиты)			
Колмозерское, Мурманская обл.	24,18	1,14	Be, Ta
Полмостундровское, Мурманская обл.	10,07	1,25	Ta, Nb
Тастыгское, Республика Тыва	17,0	1,46	Ta, Nb
Гидроминеральные (рассолы)			
Знаменское, Иркутская обл.	—	0,42	Mg, Ca, Br, Sr
Трубка Удачная, Республика Саха (Якутия)	—	0,1	Ca, Mg

месте (22,1 %) Китай, МСБ которого представлена как рудным пегматитовым, так и гидроминеральным сырьем; на третьем месте (13,8 %) гидроминеральные месторождения Аргентины и на четвертом (11 %) — пегматиты Австралии.

По производству концентрата Li₂CO₃ первое место занимает Австралия, получая порядка 40 % его общего объема из добываемых литийсодержащих пегматитовых руд, второе (33 %) и третье места (16 %) занимают Чили и Аргентина, предприятия которых используют гидроминеральное сырье. Производство концентрата в пересчете на чистый металл в 2017 г. на рудных объектах составило 18,3 тыс. т (Австралия), на гидроминеральных — 20 тыс. т (Чили и Аргентина) [7, 12, 15–17].

Основные месторождения и их параметры по ведущим зарубежным странам приведены в табл. 1. Следует отметить, что крупнейшие австралийские месторождения Гринбушес и Пилгангура содержат в пегматитовых рудах не только высокие концентрации основного металла — лития, но и попутных тан-

тала и ниобия. Запасы и прогнозные ресурсы Li₂O в гидроминеральных объектах имеют существенно меньшие масштабы и низкие содержания полезного компонента, однако технологии добычи и получения концентрата Li₂CO₃ и LiOH из них значительно экономичнее. В перечне ведущих объектов этой группы следует отметить эффективно осваиваемое месторождение Атакама (Чили) и подготавливаемое к разработке крупное месторождение Уюни (Боливия).

Минерально-сырьевая база лития РФ включает рудные и гидроминеральные месторождения (табл. 2, рисунок). В МСБ РФ ведущую позицию занимают крупные месторождения сподуменовых руд — Колмозерское, Полмостундровское и Тастыгское с содержаниями Li₂O 1,25–1,46 %, сопоставимые с крупными рудными месторождениями зарубежных стран. Кроме того, в России учтены запасы ряда комплексных месторождений, в которых литий является либо одним из основных, либо значимым попутным компонентом: в месторождениях редкометалльных пегматитов — Вороньегундровском (Мурманская обл.), Гольцовском, Урикском, Белореченском (Иркутская обл.), Завитинском (Читинская обл.), в месторождениях редкометалльных гранитов с литиевыми слюдами — Улуг-Танзекском (Республика Тыва), Орловском и Этыкинском (Читинская обл.) и в некоторых других объектах. Месторождения Вознесенское и Пограничное имеют комплексный состав: совместно с флюоритом всегда присутствуют бериллий, рубидий, цезий и литий [3, 5]. Эти попутные компоненты при переработке флюоритовых руд не извлекались, а концентрировались в хвостах флюоритовой флотации и складировались в хвостохранилищах. По данным Отдела геологии и лицензирования департамента по недропользованию по ДВФО в них содержится около 126 тыс. т оксида лития, 35,9 тыс. т оксида бериллия, 70 тыс. т оксида рубидия, 3,5 тыс. т оксида цезия. Разработка инновационных технико-технологических решений металлургического передела этих хвостов позволит удовлетворить потребность России в бериллии и литии.

Группа гидроминеральных месторождений представлена двумя основными объектами — Знаменским (Иркутская обл.) и Трубкой Удачной (Республика Саха (Якутия)). Запасы Li_2O не определены, его содержание в рассолах на первом составляют 0,42 %, на втором — 0,1 %. Наряду с диоксидом лития в рассолах присутствуют повышенные концентрации кальция, магния и других компонентов, негативно влияющие на технологию получения концентрата Li_2CO_3 . На Знаменском месторождении продуктивные рассолы самоизливом поступают к поверхности с глубины около 2000 м, на Трубке Удачной самоизлив сопровождается карьерную разработку месторождения алмазов, что существенно осложняет возможность сооружения здесь технико-технологического комплекса для получения литиевого сырья.

В настоящее время на территории России отсутствует добыча и переработка лития, и весь необходимый объем концентратов импортируется главным образом из Чили. В связи с необходимостью производства батарейных ионно-литиевых материалов, требуется существенная активизация работ по освоению отечественных объектов. В советское время литиевое сырье производилось на редкометалльном Завитинском месторождении, однако из-за низкой экономической эффективности, связанной в том числе с невысоким содержанием Li_2O в рудах (0,69 %) на его нижних горизонтах, разработка объекта была остановлена. В настоящее время наиболее приемлемыми для освоения являются Колмозерское и Полмостундровское месторождения редкометалльных пегматитов в Мурманской области. Литиевое оруденение образует поля протяженных субпараллельных пегматитовых жильных тел со сподуменом и прослеживается на глубину до 300 м без изменения основных параметров — мощности и содержания. Протяженность крупных жил варьирует в пределах 10–50 м, содержание Li_2O от 0,8 до 1,5 %, при среднем 1,34 %. Попутные компоненты — бериллий (0,037 % BeO), тантал (0,009 % Ta_2O_5), ниобий (0,01 % Nb_2O_5).

Для обогащения литиевых руд сподуменовых объектов разработана гравитационно-флотационная схема, позволяющая получать три концентрата: сподуменный (4,4 % Li_2O) с извлечением 93 %, бериллиевый (3 % BeO) — извлечение 61 %, тантало-колумбитовый (21,1 % Ta_2O_5 , 20,7 % Nb_2O_5) — извлечение 47 и 52 % соответственно. Принципиальная схема переработки литиевой сподуменной руды Колмозерского месторождения представляет собой следующий стадийный процесс: радиометрическая сепарация руды → тяжелосреднее обогащение и флотация → получение сподуменного концентрата → автоклавное щелочное вскрытие → карбонизация литийсодержащего раствора → получение Li_2CO_3 .

В группе объектов литиеносных рассолов РФ наибольший практический интерес представляет месторождение Знаменское [7]. Содержание в рассолах лития составляет 0,39 г/л, натрия — 1,9 г/л, калия — 11,7 г/л, магния — 29,0 г/л. До настоящего времени запасы основного и попутных компонентов не определены, но по экспертным оценкам они значительны, что обеспечит долгосрочную эксплуатацию при скважинной технологии добычи. В 2013–2016 гг. АО «Росэлектроника» разработало технологию производства хлорида и карбоната лития чистотой >99,5 % на основе селективного сорбционного извлечения лития из рассолов с последующим переделом получаемого концентрата в карбонат и хлорид лития, удовлетворяющих требования промышленности. Освоение месторождения Знаменское на основе разработанных технологий позволит получать порядка 800 т концентрата в год.

В условиях активно нарастающего спроса на литий конъюнктура мирового рынка, очевидно, будет активизироваться с соответствующим удорожанием литиевого сырья и концентратов, что повлияет на удорожание его импорта. В связи с этим, РФ необходимо осуществить все необходимые мероприятия по скорейшему освоению отечественных литиевых месторождений.

Никель-кобальт. Добавки Ni и Co в литиевые батареи обеспечивают их термическую устойчивость и ионную проводимость. В последнее время нарастает производство собственно кобальтовых аккумуляторов многоразового использования, что обуславливает до 50 % их общего потребления в ближайшем будущем.

Мировая МСБ никеля и кобальта достаточно велика и РФ занимает одно из ведущих мест по их запасам. Норильская группа месторождений является лидером по сумме запасов Ni и Co, а руды этого типа превосходят по качеству большинство мировых аналогов. Крупнейшим по запасам кобальта является медно-сульфидное месторождение Тенке-Фунгуреме в Демократической Республике Конго, его запасы составляют 3 млн т с содержанием 0,2 % и запасы меди — 28 млн т при содержании 2,5 %. Другие зарубежные объекты мирового уровня приведены в табл. 3. Ведущим продуцентом кобальта является ДР Конго, обеспечивающая более половины его мирового производства, РФ занимает третье место после Китая. Ведущими продуцентами никеля являются Филиппины (22 % общего объема), Россия (12 %),

Таблица 3
Основные зарубежные месторождения кобальта и никеля

Наименование	Запасы Ni/Co, млн т/тыс. т	Содержание Ni/Co, %	Добыча Ni/Co, тыс. т (* проектная)
Калгури-Никель, Австралия	5,3/320	0,72/0,04	19,5/0,9*
Уинджелина, Австралия	2/151,5	0,95/0,07	47,5/3*
Амбатуви, Мадагаскар	1,9/188	0,76/0,07	46/3,5
Горо, Новая Каледония	1,74/134,5	1,42/0,11	34,3/3,2
Веда-Вей, Индонезия	9,3/447	1,58/0,08	35/3,6*
Тенке-Фунгуреме, ДР Конго	Cu 28/3000	Cu 2,5/0,2	Cu 200/16

Канада (11 %) и Австралия (10 %). По получению рафинированных металлов ведущими являются: по кобальту — Китай (48 %), Финляндия (12 %), Бельгия (7 %), РФ занимает лишь незначительное место с 3 % от общего объема; по никелю — Китай (29 %), Россия (10 %), Япония (10 %) [7].

МСБ никеля и кобальта РФ включает объекты четырех основных геолого-промышленных типов: сульфидные медно-никелевые, магнетитовые, силикатные никелевые, бобово-конгломератовые железные руды и др. [5]. Основные месторождения названных геолого-промышленных типов и их параметры приведены в табл. 4. Очевидно ведущее значение сульфидно-медно-никелевых месторождений Норильской и Печенгской групп, запасы которых достаточно велики и могут обеспечить долгосрочную, до полувека, добычную деятельность действующих мощных предприятий, имеющих необходимую энергетическую, транспортную и социальную инфраструктуру. В ближайшей перспективе войдет в промышленное освоение сравнительно крупное месторождение никеля Кун-Манье в Амурской области, принадлежащее тому же сульфидному типу.

Технологическое освоение вышеназванных объектов не имеет серьезных проблем. Стадийный процесс переработки руд включает коллективную и селективную флотацию, гидрометаллургию и автоклавное выщелачивание, очистку от примесей и разделение металлов с получением рафинированных никеля и кобальта. Однако в связи со срабатыванием богатых руд на месторождениях Норильской группы, необходимо совершенствовать технологию переработки бедных и рядовых руд.

Таблица 4
Основные месторождения никеля и кобальта РФ

Наименование	Промтип	Доля в запасах РФ, % Ni/Co	Содержание, % Ni/Co	Доля от производства РФ, % Ni/Co
Норильская группа (Октябрьское, Талнахское, Норильск-1 и др.), Красноярский край	Сульфидно-медно-никелевый	61/44,7	0,35-0,78/ 0,015-0,035	83/72,1
Печенгская группа (Ждановское и др.), Мурманская обл.	— « —	7,2/5,7	0,32/0,023	11/8,6
Кун-Манье, Амурская обл.	— « —	1/0,4	0,66/0,013	—
Высокогорское, Свердловская обл.	магнетитовый	—/0,1	—/0,029	—/0,2
Серовское, Свердловская обл.	бобово-конгломератовый	4,6/6,8	0,16/0,02	—
Уральская группа (Буруктаьское, Точильногорское, Черемшанское и др.), Оренбургская, Свердловская, Челябинская обл.	силикатный никелевый (латеритный)	16,3/12,6	0,62/0,05	—

К резервной минерально-сырьевой базе кобальта и никеля можно отнести комплексное Серовское осадочное железорудное месторождение. В 2013–2015 гг. ВИМСом была осуществлена его разведка, в результате которой были поставлены на государственный баланс 640 млн т железа и установлены запасы и содержания попутных никеля и кобальта (табл. 4), а также хрома. Здесь впервые были установлены содержания Sc около 60 г/т. Разработанная в ВИМСе технология переработки комплексного сырья позволяет получать товарные концентраты железа, хрома, никеля и кобальта. При имеющейся обеспеченности металлургии запасами осваиваемых железорудных объектов региона именно высокоценные попутные компоненты могут определять инвестиционную привлекательность Серовского месторождения.

Силикатные кобальт-никелевые «латеритные» месторождения являются основным источником никеля и кобальта в мире. На месторождениях этого типа основана МСБ Филиппин, Новой Каледонии, Австралии, Индонезии, в сумме обеспечивающие 48 % мирового производства никеля и кобальта.

В России подобные месторождения образуют Уральскую группу — Буруктаьское, Точильногорское, Черемшанское, Сахаринское и другие с близкими геологическими условиями залегания и основными параметрами оруденения; содержание кобальта в руде составляет около 0,053 %, никеля порядка 0,62 %. По своим масштабам уральские объекты невелики, но суммарно составляют значительную долю в МСБ России — 12,6 % кобальта и 16,4 % никеля [5]. Проведенные опытно-промышленные работы на Бурук-

таьском месторождении показали приемлемые экономические результаты освоения, однако при практически полной монополии ПАО «ГМК «Норильский никель» на производство никеля и кобальта, полностью покрывающего внутренние и экспортные потребности в этих металлах, дальнейшая разработка латеритных руд была приостановлена. В то же время представляется очевидным, что в перспективе в связи с созданием и активным развитием новых отраслей их использования, особенно в электротехническом секторе, подобные объекты будут осваиваться, т.к. не требуют больших капитальных и эксплуатационных затрат для создания и деятельности геотехнологических производств (скважинное

подземное и кучное выщелачивание). Создан и апробирован в ВИМСе альтернативный, также экономически приемлемый вариант переработки латеритных руд, базирующийся на азотнокислотном автоклавном выщелачивании, термогидролизном отделении из продуктивного раствора железа и других загрязняющих компонентов и завершающим осаждением металлов в виде NiO и Co₃O₄.

Редкоземельные металлы (РЗМ) традиционно используются для производства материалов высоких технологий. В последнее время резко усилился интерес к РЗМ, которые используются развитыми странами — США, ЕС, Японией, Кореей, а теперь и Китаем при производстве новейших материалов в самых различных технологиях нового поколения. Умеренный рост потребностей в традиционных областях (стекло, керамика, люминофоры и др.) будет составлять первые проценты, в то же время спрос на РЗМ уже сейчас резко растет (до 10–15 % в год) в электронной промышленности, для изготовления никель-гидридных и литий-ионных батарей, специальных магнитов, для микролегирования авиационных металлов и сплавов, материалов для крекинга нефти.

Основная часть МСБ РЗМ мира распределена среди четырех стран: Китай (31 %), Россия (26 %), Бразилия (15,5 %), Вьетнам (15,5 %). Также 95 % производства концентратов РЗМ сосредоточено в Китае. Основные месторождения РЗМ зарубежных стран приведены в табл. 5 [13, 18]. Крупнейшим в мире является комплексное ниобий-редкоземельно-железорудное месторождение Байюнь-Обо (Внутренняя Монголия, Китай) с жильобразными телами карбонатитов, обогащенными редкоземельными элементами. Оруденение представлено бастнезитовыми рудами с гематитом, магнетитом, монацитом, пироксеном, эшинитом. Запасы РЗМ месторождения оценены в 48 млн т, что представляет около 81,7 % запасов РЗМ Китая. Кроме того, запасы железа на месторождении составляют 470 млн т, ниобия — более 1 млн т [18]. В южных провинциях Китая сосредоточены месторождения так называемых «ионных руд», представленных ионно-адсорбционными рудами в глинах кор выветривания по редкометалльным субщелочным лейкогранитам. Руды содержат невысокие концентрации (0,03–0,15 %) РЗМ, в которых содержания РЗЭ иттриевой группы

Таблица 5
Основные зарубежные редкоземельные месторождения

Наименование	Промтип	Основные минералы	Запасы РЗО, тыс. т	Содержание РЗО	Другие компоненты
Цериевоземельные ($TR_{Ce}:TR_{Y}>20$)					
Баюнь-Обо, Китай	Карбонатиты	Бастнезит, монацит	36000	5,7-6,2	Nb, Fe
Маунтин-Пасс, США	Карбонатиты	Бастнезит	2750	8,86	—
Иттриево-цериевоземельные ($TR_{Ce}:TR_{Y}=5-20$)					
Маунт-Уэлд, Австралия	Коры выветривания карбонатитов	Монацит	593	17	Nb, Ta, Ti, Zr
Манавалакуручи, Индия	Прибрежно-морские россыпи	— « —	1425	0,4	Ti, Zr
Иттриевоземельные ($TR_{Ce}:TR_{Y}<5$)					
Стрейндж-Лейк, Канада	Метасоматиты щелочные	Гадолинит, кайнозонит, гагаринит	600	1,96	Zr, Nb, Be
Туинджи, Австралия	Щелочные эффузивы		90	0,9	Ta, Nb, Zr
ВИМ-150, Австралия	Погребенные прибрежно-морские россыпи	Монацит	400	0,04	Ti, Zr

составляют около 70 % [13, 14]. Благодаря наличию мощной минерально-сырьевой базы РЗМ Китай производит более 100 тыс. т РЗМ, что составляет более 80 % их общемирового производства. Крупнейшим продуцентом РЗМ вне Китая является австралийская компания Lynas Corporation Ltd, которая в 2012 г. начала разработку австралийского месторождения кор выветривания бастнезитовых карбонатитов Маунтин-Уэлд, из руд которого получают около 16 тыс. т РЗМ [17]. В небольшом объеме разрабатываются монацитовые россыпи в Индии (~1,7 тыс. т STR₂O₃) и в Бразилии, где также ведется в небольшом объеме разработка объектов кор выветривания карбонатитов. Бастнезитовое месторождение Маунтин-Пасс (США), принадлежащее тому же карбонатитовому типу, в 2015 г. было законсервировано, но в 2018 г. вновь начало добычу. Всего в мире ежегодно производится около 130 тыс. т РЗМ, из них Россия производит 2,4 тыс. т.

Россия по запасам РЗМ занимает второе место в мире — около 33 млн т STR₂O₃. Основные месторождения РЗМ комплексные и принадлежат следующим геолого-промышленным типам: апатит-нефелиновому, лопаритовому, кор выветривания карбонатитов, щелочных метасоматитов и гранитов, апатит-карбонатных метасоматитов [5]. Перечень ведущих объектов и их основные параметры приведены в табл. 6.

В настоящее время добыча РЗМ и производство редкоземельного концентрата осуществляется лишь на крупном комплексном Ловозерском месторождении, связанном с одноименным стратифицированным

Таблица 6
Основные редкоземельные месторождения России

Наименование	Промтип	Запасы категории А+В+С ₁ +С ₂ , тыс. т ΣTR ₂ O ₃	Содержание РЗМ в руде, доля Y-группы в составе РЗМ	Другие компоненты
Ловозерское, Мурманская обл.	Лопаритовый	7184,5	$\frac{1,12}{2-3}$	Ta, Nb, TR, Ti
Юкспорское, Апатитовый цирк, Олений ручей и др., Мурманская обл.	Апатит-нефелиновый	10598	$\frac{0,32}{9-11}$	P
Томторское, уч-к Буранный, Республика Саха (Якутия)	КВ карбонатитов	3232,9	$\frac{10,59}{6-7}$	Sc, Nb, TR
Чуктуконское, Красноярский край	КВ карбонатитов	1909,3	$\frac{4,75}{8}$	Mn, Nb
Белозиминское, Иркутская обл.	КВ карбонатитов	1646	$\frac{0,9}{5-10}$	P, Nb
Селигдарское, Республика Саха (Якутия)	Апатит-карбонатный	4410	$\frac{0,35}{8-9}$	P
Катугинское, Забайкальский край	Щелочные метасоматиты	791,8	$\frac{0,37}{45-50}$	Ta, Nb, Zr, TR
Улуг-Танзекское, Республика Тыва	Щелочные граниты	485,8	$\frac{1,8}{30-50}$	Ta, Nb
Зашихинское, Иркутская обл.	Щелочные UNFYBNS	44,4	$\frac{0,07}{30-40}$	Ta, Nb, Zr, TR

массивом нефелиновых сиенитов и разрабатываемым ООО «Ловозерский ГОК» (ООО «ЛГК»). Лопарит (ниобиевый перовскит — $(Na, Ca, Ce, Sr)_2(Ta, Nb, Ti)_2O_6$, в виде мелкой вкрапленности приурочен к уртит-малиньбитам в расслоенной части массива. Вырабатываемый лопаритовый концентрат представляет собой комплексное сырье для дальнейшего производства: тантала, ниобия, цериевой группы редких земель и титана. В небольших количествах лопаритовый концентрат содержит торий и уран, что определяет его повышенную, преимущественно ториевую радиоактивность. Лопаритовый концентрат для дальнейшей переработки направляется на Соликамский магниевый завод (ОАО «СМЗ») в Пермском крае. В основе технологического цикла ОАО «СМЗ» заложено производство магния путем электролиза его солей с получением металлического магния и хлора. Хлор используется в качестве реагента для переработки сложного по составу редкометалльного сырья — лопаритового концентрата. Конечной продукцией являются: карбонаты и оксиды редкоземельных элементов (РЗЭ); тантал-ниобиевый химконцентрат; ниобаты и танталаты, пентахлориды и пентаоксиды ниобия и тантала; титан губчатый и тетрахлорид; карбонат кальция-стронция. В 2018 г. было произведено 2 595,73 т соединений РЗМ, 668,7 т соединений Nb₂O₅ и 44,1 т соединений Ta₂O₅, 1 940 т губчатого титана [11]. Большая часть произведенной продукции идет на экспорт. Ловозерский ГОК обладает большим потенциалом для роста производительности и повышения рентабельности разработки месторо-

ждения. ГОК обладает значительной ресурсной базой. Запасы руды участка Умбозеро Ловозерского месторождения составляют около 28 млн т, в том числе полезного минерала — 1,2 млн т. Также следует отметить перспективы включения в отработку соседних участков недр, характеризующихся достаточно высоким содержанием редкоземельных металлов, в т.ч. с возможностью открытой добычи. Так, запасы руд участка Аллуайв составляют около 180 млн т, месторождения Чингласуай — свыше 16 млн т лопаритовых руд и 546 млн т эвдиалитовых руд (табл. 6).

Громадные запасы РЗМ сосредоточены в Хибинском массиве агпайтовых нефелиновых сиенитов. В пределах массива разведано 9 месторождений, из которых активно разрабатываются 8 с получением апатитовых концентратов и фосфорных удобрений. Апатитовые руды перерабатываются по 2 технологиям: сернокислотной (~85 %) и азотнокислотной (~15 %). При сернокислотной переработке заключенные в апатите РЗМ частично переходят в ЭФК (экстракционная фосфорная кислота), где доля тяжелых РЗМ составляет 30,5 %, а остальная часть концентрируется в фосфогипсе с содержанием РЗМ 0,4–0,6 %, и долей тяжелых — 14,4 %.

Ежегодные потери РЗМ составляют более 120 тыс. т. В 2014 г. на ряде предприятий началось опытное производство РЗМ-продукции из апатита и фосфогипса (ОАО «Гидрометаллургический завод» в г. Лермонтов, ГК «Скайград» в г. Юбилейный Московской обл., ПАО «Акрон» в Великом Новгороде). В настоящее время в ГК «Скайград» разработана и запатентована технология переработки фосфогипса с извлечением из него редкоземельного концентрата и получением строительных материалов. Завершаются проектные работы по созданию промышленного модуля по переработке 20 тыс. т фосфогипса в год.

На предприятии «ФосАгро-Череповец» ООО «НКП Русредмет» вместе с бельгийской компанией Prayon разработана и впервые реализована в опытно-промышленном масштабе сорбционная технология коллективного извлечения РЗМ непосредственно в потоке ЭФК действующего производства. Мощность опытно-промышленной установки 12 т/год. ПАО «Акрон» была создана и запущена в 2016 г. пилотная установка получения карбонатов РЗЭ при азотнокислотной

переработке апатитового концентрата месторождения Олений Ручей, на которой предполагается получать в год до 400 т раздельных оксидов РЗМ.

Третьим источником редкоземельных металлов и Nb являются разведанные месторождения кор выветривания карбонатитов — Томторское (Республика Саха (Якутия)), Чуктуконское (Красноярский край), Белозиминское (Иркутская обл.) (рис.1, табл. 6). РЗМ в рудах этих объектов имеют более высокие содержания и повышенную долю группы «тяжелых» РЗМ по сравнению с Ловозерским. Лидером среди месторождений данного промышленного типа является Томторское с крупными запасами лантаноидов, иттрия, ниобия и скандия. Томторское редкометалльное месторождение связано с корами выветривания (КВ) одноименного карбонатитового массива, перекрытыми угленосными горизонтально залегающими пермскими отложениями. Коры выветривания представлены переложенными, эпигенетически измененными разностями, с которыми связано комплексное пироксоло-нацит-крандалитовое оруденение. Содержание $\Sigma\text{La}_2\text{O}_3$ варьирует (%) в пределах 2,2–27,8; Y_2O_3 0,178–2,94; Nb_2O_5 1,63–16,4; Sc_2O_3 0,0146–0,098. Мощность рудного пласта изменяется от одного до 40 м, в среднем около 10 м. На месторождении выделены и разведаны три участка — Буранный, Северный и Южный. В настоящее время подготавливается к освоению участок Буранный, на котором сосредоточены богатые руды по всем полезным компонентам (%): TR_2O_3 — 10,59 (в том числе Y_2O_3 — 0,59); Nb_2O_5 — 3,99; Sc_2O_3 — 0,04. Запасы руд участка Буранный составят 3 232,8 тыс. т. Решением недропользователя ОАО «Восток Инжиниринг» предусматривается ежегодная добыча 150 тыс. т руды, с ее переработкой в Юго-Восточном Забайкалье вблизи г. Краснокаменск на предприятии, которое предстоит еще построить. Запасы Северного и Южного участков составляют 324,2 и 581,8 тыс. т соответственно при средних содержаниях: TR_2O_3 — 8,71 и 9,65 %, (в том числе Y_2O_3 0,59); Nb_2O_5 — 1,91 и 1,45 %; Sc_2O_3 — 260 и 210 г/т. Освоение Томторского месторождения полностью покрывает современные и будущие потребности страны в РЗМ, ниобии и скандии. Технология переработки комплексных руд имеет сложный, стадийный характер и включает различные гидрометаллургические методы, позволяющие получать ниобиевый концентрат, соединения лантаноидов и иттрия с извлечением 78–80 % и скандия с извлечением до 54 %.

В МСБ РЗМ России важное место занимают Катугинское и Улуг-Танзекское редкометалльные месторождения, в рудах которых в суммарных содержаниях редких земель дефицитные элементы «тяжелой» группы составляют около половины [2, 3, 4, 5]. Катугинское месторождение (Забайкальский край), как и другие редкометалльные объекты, является комплексным, его руды содержат Ta, Nb, TR, Zr. При этом главным компонентом являются РЗМ, среди которых наибольший практический интерес представляют лантаноиды иттриевой группы и иттрий. Месторождение располагается в зоне кварц-альбит-микроклиновых

метасоматитов и представлено крупным, линзовидным, вертикально ориентированным телом, разделенным разрывом на восточный и западный блоки, прослеженным на глубину до 800 м при мощности около 400 м. Концентрации полезных компонентов имеют средний уровень (%): TR_2O_3 — 0,348; Nb_2O_5 — 0,309; Ta_2O_5 — 0,019; Zr_2O_3 — 1,57. Разработанная гравитационно-магнитно-флотационная технология обогащения позволяет получить цирконовый, пироксоловый и редкоземельный концентраты, из которых два последних требуют применения гидрометаллургической переработки с выделением ниобиевой, танталовой, редкоземельной и иттриевой продукции.

Определенный интерес представляет освоение Улуг-Танзекского редкометалльного месторождения в щелочных гранитах (Республика Тыва), руды которого, так же как и на Катугинском месторождении, содержат значительную долю редкоземельных элементов дефицитной «тяжелой» группы, а также востребованные промышленностью ниобий и тантал.

Ниобий и тантал имеют большое значение в производстве материалов высоких технологий.

Основной объем потребления **ниобия** (около 85 %) в виде феррониобия (содержащего до 65 % Nb) связан с производством высокопрочных металлов и сплавов, труб большого диаметра и других производств, использующих его уникальные легирующие свойства. В то же время ниобий как тугоплавкий, жаростойкий, сверхпроводимый и коррозионно-устойчивый металл, широко применяется в атомной и аэрокосмической промышленности.

Традиционными сферами использования **танталовых** продуктов являются: электровакуумная техника (аноды, сетки, геттеры, детали высокотемпературных вакуумных печей); производство жаропрочных, твердых и сверхтвердых сплавов для режущих инструментов; химическое аппаратостроение, включая заводское и лабораторное оборудование; легирование сталей и сплавов. Наиболее значительная область применения тантала — производство танталовых конденсаторов, используемых в ЭВМ, приборостроении, автомобильной и оборонной промышленности. Кроме того, тантал как единственный из металлов, вживляющийся в тело человека, применяется в хирургии для сшивания кровеносных сосудов, протезирования органов человеческого тела и изготовления медицинских инструментов [9].

Мировые потребности в **ниобии** на многие десятилетия обеспечены масштабной минерально-сырьевой базой. За рубежом и в России ведущими по запасам и качеству руд являются месторождения в карбонатитах: Араша (Бразилия) — с пироксоловым оруденением в остаточных корях выветривания одноименного массива, с содержанием Nb_2O_5 3 %, Сент-Оноре (Канада) — с первичными рудами и Томторское (РФ) — с переложенными рудами (табл. 7, 8).

Разработка бразильского гиганта в течение последних десятилетий на 80–85 % обеспечивает мировые потребности в ниобии в виде ферросплава. Меньший объем производства концентрата и сплава связан с

разработкой канадского объекта. Россия, имея одну из крупнейших в мире МСБ ниобия, его импортирует, покрывая лишь незначительную долю потребностей за счет собственного сырья.

Основные российские редкометалльные месторождения комплексных ниобийсодержащих руд [5] представлены в табл. 8.

Производство соединений ниобия (тантал-ниобиевый химконцентрат, пентахлориды и пентаоксиды ниобия и тантала) осуществляется лишь в объеме около 600 т на Соликамском магниевом заводе (СМЗ) [11] из лопарита, добываемого на Ловозерском месторождении, при этом потребность в них составляет

3–4 тыс. т в пересчете на Nb_2O_5 . В перспективе при переработке 150 тыс. т комплексных руд Томторского месторождения наряду с РЗМ и Sc возможно получать большой объем Nb_2O_5 (порядка 8–9 тыс. т в год), что полностью покроеет внутренние потребности. Также, в зависимости от размещения будущих перерабатывающих производств, перечня наиболее востребованных попутных компонентов, логистики и других факторов могут быть приняты решения о начале освоения других месторождений — Белозиминского, Большештагнинского, Катугинского и т.д. [1, 2, 8, 9, 10].

Мировое производство *тантала* составляет около 1800 т в год, его основными потребителями являются

США, Япония, страны ЕС и Юго-Восточной Азии. Производство концентрата (>30 % Ta_2O_5) сосредоточено главным образом в Конго (Киншаса), Руанде, Нигерии, Бразилии, Китае, Австралии. По оценкам российских экспертов [10] общие мировые запасы Ta_2O_5 в недрах составляют более 260 тыс. т, что на многие десятилетия обеспечивает потребность промышленности в тантале. Основные зарубежные месторождения с запасами более 4 000 т каждое и с содержанием Ta_2O_5 в рудах более 0,015 % приводятся в табл. 9.

В Российской Федерации товарное производство тантала ведется лишь на ОАО «СМЗ» [11], где из лопаритового концентрата Ловозерского месторождения получают около 50 т соединений тантала в год. Недостающий объем сырья для металлургической, электронной и других отраслей импортируется. В то же время МСБ тантала РФ достаточно велика и разнообразна по промышленным типам, масштабам и пространственному размещению месторождений. В табл. 10, составленной по материалам В.В. Рябцева и др. [10], приведены основные параметры средних и крупных объектов (более 4000 т) с рядовыми и богатыми рудами (содержание Ta_2O_5 более 0,015 %), т.к.

Таблица 7
Основные зарубежные месторождения ниобия

Месторождение	Промтип	Ресурсы, млн т	Содержание, % Nb_2O_5
Араша, Бразилия	карбонатиты	460	>2,5
Сейс-Лагос, Бразилия	карбонатиты	2897	2,8
Сент-Оноре, Канада	карбонатиты	458	0,87
Бонга, Ангола	карбонатиты	824	0,48
Каталао II, Бразилия	карбонатиты	25,2	0,96
Монтвилл, Канада	карбонатиты	183,9	0,13
Прейри-Хилл, Канада	карбонатиты	517	0,02
Сукулу, Уганда	карбонатиты	230,7	0,24
Мрима-Хилл, Кения	карбонатиты	142,2	0,7
Монтцфельд, Гренландия	агпаитовые	340	0,19
Гурайах, Саудовская Аравия	агпаитовые	400	0,28
Нечалачо, Канада	агпаитовые	121,3	0,34
Стрэйндж-Лэйк, Канада	агпаитовые	278	0,18
Питинга, Бразилия	щелочные граниты	266,7	0,17

Таблица 8
Основные месторождения ниобия РФ

Месторождения	Промышленный тип	Доля в МСБ, кат. А+В+С ₁ +С ₂ , %	Содержание Nb_2O_5 , %
Ловозерское, Мурманская обл.	В дифференцированных массивах агпаитовых нефелиновых сиенитов	20,3	0,24
Томторское, Республика Саха (Якутия)	Кора выветривания карбонатитовых массивов	15,6	3,99
Чуктуконское, Красноярский край	Кора выветривания карбонатитовых массивов	5,7	0,74
Белозиминское, Иркутская обл.	В массивах ультраосновных пород и метасоматитов	14,9	0,35
Большештагнинское, Иркутская обл.	В массивах ультраосновных пород и метасоматитов	5,2	0,98
Катугинское, Забайкальский край	В щелочных метасоматитах	7,8	0,35
Улуг-Танзекское, Республика Тыва	В щелочных гранитах	13,7	0,15

Таблица 9
Основные зарубежные месторождения тантала

Место-рождение	Промтип	Запасы, т	Сод. Ta ₂ O ₅ , %
Гринбушес, Австралия	редкометалльные пегматиты	30 000	0,036
Воджина, Австралия	кора выветривания, россыпи по пегматитам	11 600	0,04
Питинга, Бразилия	метасоматиты по щелочным гранитам	30 000	0,03
Цингун, Китай	редкометалльные граниты	6 000	0,017
Нанпинг, Китай	редкометалльные граниты	4 250	0,03
Тер-Лейк, Канада	кварц-альбит-микрo-клиновые метасоматиты	9 600	0,036
Абу-Даб-баб, Египет	редкометалльные граниты	8 025	0,027
Мувеиби, Египет	редкометалльные граниты	3 470	0,08
Эшассьер, Франция	редкометалльные граниты	4 000	0,023–0,034

Таблица 10
Основные месторождения тантала РФ

Месторождения	Промтип	Доля в запасах РФ, %	Содержание Ta ₂ O ₅ , %
Собственно танталовые месторождения			
Вишняковское, Иркутская обл.	танталовый в гранитных пегматитах	2	0,0198
Улуг-Танзекское, Республика Тыва	ниобий-танталовый в щелочных гранитах	27	0,0155
Катугинское, Читинская обл.	иттриевоземельно-ниобий-танталовый в щелочных метасоматитах	9	0,021
Ловозерское, Мурманская обл.	редкоземельно-ниобий-танталовый в нефелиновых сиенитах (лопаритовый)	29	0,019
Зашихинское, Иркутская обл.	ниобий-танталовый в щелочных гранитах	4	0,03

только они, с учетом других геолого-экономических и технологических условий, могут рассматриваться в качестве рентабельных для освоения.

Запасы тантала на приведенных в табл. 10 объектах, а также ряда других (Этыкинского, Белозиминского, Орловского, Алахинского, Липовый Лог, Урикского, Гольцового и др. (рисунок) в несколько раз превышают потребности настоящего времени и ближайшего будущего. Первоочередными объектами для разработки могут стать подготовленные к освоению Зашихинское месторождение с наиболее высокими содержаниями в рудах Ta₂O₅ и Катугинское, комплексные руды которо-

го содержат наряду с танталом ниобий, «тяжелые» лантаноиды, иттрий и цирконий, что должно существенно повысить экономическую эффективность его освоения.

Для каждого из месторождений разработаны конкретные технологические схемы обогащения и глубокой переработки руд, учитывающие их индивидуальные минералого-геохимические особенности. Однако, как показал недавний опыт переоценки Белозиминского, Отбойного и Зашихинского месторождений, на современном этапе необходимо существенное совершенствование ранее созданных технологий на основе новых мировых достижений, что позволит повысить экономическую эффективность их отработки.

Бериллий обладает рядом уникальных свойств, которые обуславливают его применение во многих высокотехнологических производствах. Низкая величина сечения захвата тепловых нейтронов, а также малая масса делает бериллий перспективным для использования в атомных реакторах. Из него изготавливаются замедлители и отражатели нейтронов для этих установок. Уникальные качества металлического бериллия нашли широкое применение в аэрокосмической, атомной, электронной, телекоммуникационной промышленности и в других отраслях народнохозяйственной деятельности. В авиакосмической промышленности и при производстве компьютеров широко используются сплавы бериллия с алюминием, в которых его содержание достигает 65 %. Сплавы с медью, алюминием, магнием, литием и другими металлами используют для производства высокопрочных пружин, гироскопов, различного электротехнического оборудования, электронных устройств. По оценкам геологической службы США мировое потребление Be составляет порядка 350 т в год [20]. Мировые запасы без стран СНГ бериллия (BeO) составляют порядка 1100 тыс. т [6]. Ведущими странами по запасам BeO являются (тыс. т): Китай — 100 (Коктогай, Шицунань и др.), Бразилия — 360 (Боа-Виста, Браматос и др.), США — 52 (Спор-Маунтин, Сьерра-Бланка и др.), Австралия — 40 (Брогмен, Маунт-Линдсей и др.), а также ЮАР — 40, Индия — 160, Зимбабве — 25, Мозамбик — 18, Руанда — 25, Эфиопия — 25, Уганда — 30, Аргентина — 30, Канада — 16. Ведущие промышленные типы месторождений — берtrandит-аргиллитовые и берtrandит-фенакитовые метасоматиты, берилл-полевошпатовые, берилл-слюдяные, апокарбонатные редкометалльно-флюоритовые метасоматиты, редкометалльные пегматиты. Содержание BeO в рудах варьируется от 0,2 до 1,0 %. Основными производителями бериллиевой продукции полного цикла являются США, Китай и Казахстан.

По разведанным запасам Россия занимает второе место в мире. Основные месторождения с запасами BeO более 5 % от общего объема в РФ и его содержаниями в рудах более 0,1 % приведены в табл. 11, составленной по материалам И.И. Куприяновой, Е.П. Шпанова [6].

Кроме приведенных в табл. 11 основных российских месторождений на территории России распо-

Таблица 11
Основные месторождения бериллия РФ

Месторождения	Промтип	Доля запасов BeO от РФ, %	Содержание BeO в рудах	Другие полезные компоненты
Ермаковское, Республика Бурятия	берtrandит-фенакит-флюоритовые метасоматиты	6,1	1,18	флюорит
Ауникское, Республика Бурятия	-«-	5,4	0,18	флюорит
Малышевское, Свердловская обл.	берилл-сланцевые метасоматиты	6,2	0,14	изумруды
Боевское, Челябинская обл.	-«-	13,9	0,12	—
Пограничное, Приморский край	бериллиеносные флюоритовые метасоматиты	7,6	0,21	флюорит, Li, Rb, Cs

лагается ряд мелких и средних по запасам объектов с редкометалльными комплексными рудами, но с пониженными содержаниями BeO — Колмозерское, Вороньтундровское с Li и Ta, Липовый Лог (Ta), Гольцовое и Урикское (Li и Ta), Завитинское (Li), Вознесенское (Li, Rb, Cs, флюорит). Они могут быть востребованы при наличии промышленной технологии получения всего комплекса полезных компонентов и их реализации на рынке.

В настоящее время ни одно бериллиевое месторождение РФ не разрабатывается и весь его необходимый объем импортируется главным образом из Казахстана. Однако, учитывая стратегическое и двойное назначение металла, в ближайшей перспективе должно начаться производство сырья, и первоочередным объектом для освоения, по всей видимости, будет Ермаковское месторождение.

Месторождение Ермаковское располагается в 180 км от Улан-Удэ в достаточно освоенном районе. Берtrandит-фенакитовое оруденение образует 9 жилково-вкрапленных зон, мощность которых варьирует от 1 до 50 м (в среднем около 10 м), а содержание BeO изменяется от 0,92 до 1,38 %. Месторождение разрабатывалось карьером с 1975 по 1989 г., добытая руда на переработку транспортировалась на Ульбинский завод, принадлежащий теперь Республике Казахстан. Однако впоследствии добыча была прекращена; значительная часть запасов флюорит-бериллиевых руд осталась в недрах неосвоенной, на бортах карьера сохранились отвалы забалансовых руд. Для ермаковских руд была разработана и промышленно освоена технологическая схема переработки, включавшая их обогащение покусковой фотонейтронной сепарацией, коллективную флотацию и флотацию флюорит-бериллиевого концентрата, что в результате позволяет получать товарные бериллиевые и флюоритовые концентраты с содержанием 16 % BeO и 6 % CaF₂ соответственно. Бериллиевый концентрат подвергается химико-технологической переработке для производства BeO или фторида бериллия, из которого магнийтермическим

восстановлением получают металлический бериллий. Таким образом, Ермаковское месторождение должно явиться первым объектом для добычи руд бериллия с последующей их переработкой на Ульбинском заводе, а позднее — на отечественном перерабатывающем комплексе, который наиболее целесообразно создать на Забайкальском ГОКе в пос. Первомайский (Забайкалье).

Вместе с тем, как было уже сказано, хвостохранилища Ярославского ГОКа содержат около 35,6 тыс. т

оксида бериллия, 126 тыс. т оксида лития, которые находятся на поверхности уже в мелкодисперсном состоянии. По разработанной ВИМСом и ВАМИ технологии переработки хвостов путем выщелачивания полезных компонентов алюминатными и алюмощелочными водными растворами извлечение составит: по бериллию 87 %, по литию 85–88 %, по фтору 81 %.

Цирконий, благодаря высокой устойчивости к коррозии, щелочам и кислотам, широко используется как микролегирующая добавка к спецсталим и спецсплавам. Он также применяется при производстве сантехнической продукции, а его основной минерал циркон и цирконсодержащие пески — как формовочный материал при литье металлов. Около 10–15 % общего объема его потребления связано с производством материалов высоких технологий и в первую очередь с атомной отраслью. На атомном уровне цирконий обладает весьма незначительным диаметром захвата тепловых нейтронов, что вместе с устойчивостью к агрессивным условиям делает его незаменимым при изготовлении спецсплавов, используемых для оболочек тепловыделяющих ядерных элементов в атомных реакторах. Он также применяется при производстве U-Zr топлива, где его доля варьирует от 20 до 60 %. При этом первоначальная загрузка топлива в реакторы ВВЭР-1000Т составляет около 1150 кг с последующей подпиткой порядка 650 кг/г. Цирконий является важным компонентом материалов, используемых в интенсивно развивающемся производстве рентгенофлуоресцентной измерительной аппаратуры.

Мировой минерально-сырьевой потенциал циркония огромен и составляет более 100 млн т оксида металла, сосредоточенных главным образом в прибрежно-морских россыпях. Странами-лидерами по запасам сырья и производству цирконового концентрата являются Австралия — 14 млн т ZrO₂ и 600 тыс. т производства концентрата, ЮАР — 7,2 млн т и 350 тыс. т, Индия — 9 млн т и 110 тыс. т. Запасы диоксида циркония России составляют около 12 млн т при производстве концентрата 8 тыс. т в год. Отличие МСБ циркония

РФ от мировой в том, что ее основная часть связана с эндогенными объектами при подчиненной роли россыпных [2, 3, 4]. Основные месторождения этих двух типов приведены в табл. 12. Наиважнейшее значение в МСБ и в производстве циркониевой продукции имеет коренное комплексное Ковдорское месторождение (рисунок), приуроченное к одноименному карбонатитовому массиву. В разрабатываемых железных рудах основного полезного ископаемого объекта, наряду с апатитом и магнетитом в значительном количестве (2219 тыс. т) содержится циркониевое оруденение в виде высокоценного бадделеита (ZrO_2), концентрат которого производится здесь в объеме около 7–8 тыс. т в год и практически полностью экспортируется. Следует отметить, что другие источники получения подобной продукции в мире отсутствуют. Еще большие запасы оксида циркония — более 3 000 тыс. т сосредоточены на коренном циркон-пирохлоровом Катугинском месторождении (рисунок), редкометалльные руды которого содержат также ниобий, тантал, дефицитные иттрий и редкие земли иттриевой группы. Учитывая высокую востребованность практически всех компонентов катугинских руд, представляется весьма вероятным, что это месторождение в скором времени может стать реальным источником минерального сырья для металлов высоких технологий.

Значительные запасы циркония содержатся в россыпных месторождениях — Центральном, Лукояновском, Туганском и др. (рисунок, табл. 12), где он представлен цирконом, ассоциирующим в тяжелых шлихах с ильменитом, рутилом и другими минералами. Однако месторождение Центральное по недавней геолого-экономической оценке представляется в инвестиционном отношении мало привлекательным; наиболее пригодными для разработки в современных экономических условиях являются Туганское, Бешпагирское и Лукояновское месторождения — объекты, имеющие значительные запасы качественных руд с содержанием ZrO_2 в продуктивных песках более 8 кг/м³. Эти объекты практически полностью подготовлены для освоения, а месторождение Туганское более 10 лет разрабатывается в режиме опытно-промышленной эксплуатации. Технология обогащения рудных песков включает получение черновых концентратов на винтовых сепараторах и последующую их доводку с использованием методов электрической и магнитной сепарации, обеспечивающую получение концентрата с содержанием диоксида циркония более 60 %. Глубокая переработка концентрата позволяет по-

лучать диоксид циркония, металлический цирконий, а также различные соединения циркония.

Таким образом, минерально-сырьевая база циркония способна полностью покрыть текущие и будущие потребности России. От экспорта бадделеитового концентрата нецелесообразно отказываться из-за высокого экономического эффекта, однако импорт цирконового концентрата в современном объеме около 10 тыс. т вполне может быть замещен его производством на отечественных россыпных месторождениях и коренном Катугинском.

Скандий — один из самых актуальных элементов в производстве новых материалов, используемых в аэрокосмической отрасли. Прочностные свойства алюминий-магниевого сплава при легировании скандием увеличиваются более чем в 1,5 раза. Эти особенности металла были известны еще в 1960-х годах, однако «скандиевый бум» возник в период разработки и строительства космического аппарата «Буран», который рассматривался как первенец нового семейства возвращаемых кораблей. Однако вскоре космическая программа по «Бурану» была свернута, авиастроение также не проявляло к скандию интереса, и минерально-сырьевое направление в его профиле постепенно вошло в общие для редких металлов параметры развития. В современный период активного развития высокотехнологичных отраслей, в первую очередь авиастроения, космической и электронной промышленности, потребление скандия, как и многих других редких металлов, будет возрастать, что требует определения и подготовки к освоению первоочередных источников его получения.

Мировое потребление скандия составляет около 20 т в год. Источниками скандия являются месторождения различных типов: фосфор-урановые с попутным скандием и редкими землями в глинах с костным детритом (Меловое, *Казахстан* — отработано), цирконий-титановые с попутным скандием в при-

Таблица 12
Основные месторождения циркония РФ

Месторождение	Геолого-промышленный тип	Запасы ZrO_2 A+B+C ₁ +C ₂ , тыс. т	Содержание ZrO_2 в рудах	Другие компоненты
Ковдорское, Мурманская обл.	коренной бадделеит-apatит-магнетитовый	2219,8	0,15 %	Fe, P
Катугинское, Забайкальский край	коренной циркон-пирохлор-криолитовый	3085,5	1,58 %	Nb, Ta, TR
Улуг-Танзекское, Республика Тыва	коренной циркон-пирохлор-колумбитовый	2900,2	0,4 %	Nb, Ta, TR
Туганское, Томская обл.	россыпной циркон-рутил-ильменитовый	980,2	7,62 кг/м ³	Ti
Центральное, Тамбовская обл.	россыпной циркон-рутил-ильменитовый	830,2	3,12 кг/м ³	Ti
Лукояновское, Нижегородская обл.	россыпной циркон-рутил-ильменитовый	388,9	13 кг/м ³	Ti
Бешпагирское, Ставропольский край	россыпной циркон-рутил-ильменитовый	165,8	7,84 кг/м ³	Ti

брежно-морских россыпях (Малышевское, *Украина*), титановые с попутным скандием в аллювиальных россыпях (Иршанская группа, *Украина*). Кроме того, небольшое количество скандия получали при разработке разнотипных месторождений: урановых пластово-инфильтрационного типа (плато Колорадо, *США*), пегматитовых с тортвейтитом (Ивеланд, *Норвегия*, Бефанамо, *о. Мадагаскар*), грейзеновых олово-вольфрамовых, жильно-штокверкового уранового Радим-Хилл (*Австралия*), при добыче урана методом подземного скважинного выщелачивания (Далматовское и Хохловское, *Россия*) и др. Некоторые месторождения содержат скандий в качестве основного компонента. В последние годы прошлого века разведаны месторождения, в которых скандий относится к числу основных полезных компонентов: Желтореченское (*Украина*) в амфибол-эгириновых метасоматитах, Томторское (Республика Саха (Якутия)), в переотложенных и эпигенетически-измененных корах выветривания карбонатитов, месторождения в корах выветривания габброидов и гипербазитов с никелем (Лакнау, Нингэн, Ханибагл и др., Австралия) [3].

В России небольшие потребности в скандии (около 1 т/год) покрываются за счет извлечения металла и его соединений из отходов промышленных предприятий в первую очередь при переработке ильменитовых концентратов. В современный период нарастающего потребления легких и прочных сплавов необходима подготовка к освоению первоочередных природных и техногенных объектов различных типов — месторождений кор выветривания карбонатитов, титан-циркониевых россыпей, ураноносных палеодолин, ильменит-титаномагнетитовых руд, отходов обогащения титаномагнетитовых руд и переработки бокситов (красных шламов).

Наиболее подготовленным к попутному получению скандия является урановое месторождение в песчаниках Далматовское (Курганская обл.), осваиваемое скважинным подземным выщелачиванием (СПВ). Среднее содержание Sc_2O_3 в урановых рудах варьирует в диапазоне 0,001–0,01 %, достигая в отдельных случаях 0,1 %. На месторождении уже создана и прошла опытно-промышленную эксплуатацию установка по извлечению скандия из ураноносных промрастворов, позволяющая получать от 600 кг до 1500 т скандия чистотой 99,9 % в год. Этот или подобный технико-технологический комплекс может быть использован для получения скандиевой продукции на других месторождениях-аналогах Зауральского рудного района — Хохловском и Добровольном, а также на объектах Витимского района (Республика Бурятия).

Среди большого количества россыпных скандиевых титан-циркониевых объектов наиболее подготовленным для промышленного освоения является Туганское месторождение (Томская обл.), практически полностью оснащенное горно-добычным и обогащательным оборудованием. Утвержденные запасы скандия, концентрирующегося в ильмените, лейкоксене, рутиле и цирконе, варьируют в широком диапазоне содержаний Sc_2O_3 в минералах — 70–130 г/т.

Возможным источником скандия, а также ниобия и редких земель может стать Томторское месторождение (Республика Саха (Якутия)), на котором крупные запасы руды с высокими содержаниями редких элементов сосредоточены в корах выветривания карбонатитового массива и представляют собой природный концентрат для последующего гидрометаллургического передела. Краткая характеристика объекта приведена выше. Скандий концентрируется в монаците, ксенотиме и цирконе. Содержание Sc_2O_3 в рудах составляет 380 г/т. Скандий будут получать вместе с другими редкими элементами гидрометаллургическим переделом обогащенных томторских руд на предприятии, которое планируется построить в Юго-Восточном Забайкалье близ г. Краснокаменск. При первоначально намеченном объеме годовой переработки в 150 тыс. т руд производство металла должно составить около 20 т, которые в полном объеме покроют растущие внутренние и значительную часть экспортных потребностей страны на долгосрочный период.

Высокие концентрации скандия установлены в ильмените и в породообразующих минералах титанмагнетитовых месторождений. Наиболее высокие его содержания (до 520 г/т Sc_2O_3) определены в ильменитах Ариадненского месторождения (Приморье) [3]. В то же время из пироксеновых хвостов мокрой магнитной сепарации Качканарского ГОКа, содержащих 100–150 г/т Sc_2O_3 , гидрометаллургической технологией, разработанной ВНИИХТом, возможно получение скандия высокой чистоты (до 99 %).

Переработка отходов для получения скандия, как направление двойного назначения — получение полезных компонентов и снижение экологической нагрузки на окружающую среду, возможна применительно к токсичным красным шламам и отходам серноокислотного производства пигментного диоксида титана на Крымском ПО «Титан». Однако для этого необходимы создание и освоение промышленных технологий, которые, по нашему мнению, целесообразно применить в первую очередь для переработки текущих отходов.

Таким образом, в стране для производства скандия имеется необходимая минерально-сырьевая база и технологические решения. Для подготовки к реализации первоочередного проекта требуется правительственное решение по конкретным видам и объемам скандиевой продукции, в соответствии с которым могут быть определены наиболее приемлемые минерально-сырьевые источники, адаптированы технологии добычи и переработки руд и рассчитаны геолого-экономические параметры освоения.

Сплавы с рением обладают высокой жаростойкостью и широко используются при производстве конструкционных материалов, таких как лопатки турбин реактивных самолетов, сопла ракет, а также других изделий, применяемых для условий высоких температур. Кроме того, рений используется при изготовлении разного рода катализаторов и антикоррозионных покрытий. Его мировые потребности составляют около 50 т в год, в России — несколько тонн.

Общие мировые запасы рения составляют около 13 000 т, в том числе 3 500 т в молибденовом сырье и 9 500 т — в медном. Основными минерально-сырьевыми источниками в мире являются руды медно-порфирировых месторождений и медистых песчаников. Осваиваемые медно-порфирировые объекты имеются в Канаде — Айленд-Коппер и др., в США — Бингем, Или и др., в Чили — Чукикамата, Эль-Тепиенте и др., в Казахстане — Джекказган, Коунрад, Бошекуль и др. и в ряде других стран [3, 4]. Рений в рудах этих месторождений связан с молибденитом, где его содержание колеблется в широких пределах, начиная от десятитысячных долей процента и достигая в некоторых случаях десятых долей, самые высокие значения коррелируют с повышенными концентрациями меди в рудах. Наиболее высокой рениеносностью характеризуются молибденовые концентраты медно-порфирировых месторождений: среднее содержание 660 ± 68 г/т. С этим промышленным типом связано около 80 % мировой добычи рения, лидером является месторождение Чукикамата (Чили).

Месторождения промышленного типа рениеносных медистых песчаников и сланцев представлены главным образом Джезказганской группой объектов в Республике Казахстан — Джезказган, Итауз, Сарыоба и др. Рудные тела имеют пластовую форму с вкрапленным оруденением, наряду с медью присутствуют в промышленных концентрациях Pb и Zn, попутные компоненты — Ag и Re. Содержание рения в рудах составляет 1–1,6 г/т, в медном концентрате 18–23 г/т [4].

В России рениевая продукция производится из вторичного сырья, а также импортируется из Казахстана. Минерально-сырьевая база Re в РФ связана с месторождениями двух промышленных и одного потенциально промышленного типа: медно-порфирировый — Михеевское (Челябинская обл.), Сорское и Агаскырское (Республика Хакасия) и др.; пластово-инфильтрационное Брикетно-Желтухинское (Рязанская обл.); потенциально промышленный фумарольный Вулкан Кудрявый (о. Итуруп, Сахалинская обл.) [3, 5]. На единственном разрабатываемом медно-порфирировом месторождении Сорское при переработке руд получают только медный концентрат и ферромолибден, при этом рений не извлекается. Весьма перспективным для получения рения является крупное медно-порфирировое месторождение Михеевское, в молибденидах которого установлено весьма высокое его содержание — до 2000 г/т. Столь же перспективным для попутной добычи рения является подготавливаемое к освоению Ак-Сугское месторождение. Перспективным является единственное собственно рениевое пластово-инфильтрационное Брикетно-Желтухинское месторождение, где попутными компонентами являются уран и молибден. Месторождение проектируется к отработке способом скважинного подземного выщелачивания. Проблемой является положение района в густонаселенном и экономически развитом районе Центрального ФО РФ, в связи с чем освоение этого месторождения вызовет активное противодействие местного населения и экологических правительствен-

ных и общественных организаций. Интереснейшим и безусловно перспективным для промышленного получения рения и других элементов является фумарольное месторождение Вулкан Кудрявый. Месторождение приурочено к кратерной части вулкана и связано с участками активной фумарольной деятельности с непрерывной эмиссией газов: только лишь за одни сутки вулкан выбрасывает в атмосферу около 50 тыс. т газов. Динамические запасы рения в фумарольных газах учтены Госбалансом по кат. С₂ в количестве 36,7 т/год. Содержание рения в газах 0,5–1,0 г/т. Фумарольные газы также содержат индий, германий, кроме того, присутствуют золото, висмут. В настоящее время на Вулкане Кудрявый начала действовать опытно-промышленная установка для добычи рения. Был получен концентрат с содержанием рения 1 %. В промышленном масштабе она должна начать работать в 2019 г. Плановая производительность установки — 1,5–2 т металла в год.

Таким образом, можно считать, что МСБ рения РФ, представленная различными типами месторождений, вполне достаточна и пригодна для получения рениевой продукции. Первоочередными объектами для извлечения из руд рения являются медно-порфирировые месторождения Михеевское, Аксугское и Вулкан Кудрявый.

Кроме рассмотренных видов минерального сырья для производства материалов высоких технологий используются также Pt, Sb, Jn, Ga и др. Их минерально-сырьевые источники вполне достаточны, детально охарактеризованы в многочисленных публикациях и в связи с этим в статье не рассматриваются.

Выводы

Россия располагает мощной минерально-сырьевой базой металлов для высоких технологий, которая по своим количественным и качественным параметрам не уступает ведущим зарубежным странам. Многие, в том числе крупные отечественные объекты являются комплексными и их освоение позволит обеспечить производство сразу нескольких востребованных компонентов. Так, например, подготавливаемое к разработке Томторское месторождение с планируемым годовым объемом добычи 150 тыс. т руды, способно полностью покрыть внутренние и экспортные потребности страны в *ниобии, скандии и РЗМ*. На Белозиминском месторождении возможно получать *ниобий и РЗМ*, а также апатит, а на Чуктуконском — кроме них и дефицитный *марганец*. Получение *скандия* возможно при попутном извлечении из растворов подземного выщелачивания на уран-полиэлементных месторождениях Зауралья и Забайкалья. *РЗМ*, в том числе тяжелой группы, и *иттрий* можно производить при комплексной разработке Катугинского и участка Аллуайв Ловозерского месторождений. Крупнейшим источником *РЗМ* мирового уровня являются апатит-нефелиновые руды Хибин, для промышленного получения которых в необходимом объеме при производстве фосфорных удобрений, в т.ч. в виде индивидуальных соединений в настоящее время решены технико-технологические задачи, определенные на

правительственном уровне. Крупными источниками могут стать техногенные образования — красные шламы для *скандия* и *РЗМ*, фосфогипс — для *РЗМ* и *стронция*. Для определения первоочередных объектов разработки на указанные компоненты требуется комплексная сравнительная геолого-экономическая переоценка месторождений.

Учитывая запасы и качество *танталовых* руд для первоочередного освоения следует выделить недавно разведанное и подготовленное к разработке Зашихинское, а также Катугинское месторождение.

При сохранении весьма выгодного экспорта *циркония* в виде баделлита с Ковдорского месторождения, его производство в виде циркона следует организовать на Туганской титан-цирконовой россыпи, где проводилась опытно-промышленная эксплуатация, а в настоящее время завершается проектирование и начинается строительство горно-промышленного предприятия. Также значительные запасы оксида циркония сосредоточены на Катугинском месторождении.

Источниками *никеля* и *кобальта* на долгосрочную перспективу останутся сульфидно-медно-никелевые руды Норильского и Печенегского районов. Также безальтернативным для разработки на *бериллий* является Ермаковское месторождение, тогда как организация извлечения Li, Rb, Cs и Be из техногенных образований Ярославского ГОКа — хвостов обогащения Вознесенского и Пограничного флюоритовых месторождений сопряжено с рядом организационных, технологических и экологических проблем.

Актуальным является обеспечение производства батарейных материалов отечественным *литиевым* сырьем. Для первоочередного освоения наиболее пригодно Колмозерское месторождение сподуменовых пегматитов в Мурманской области с экономически приемлемыми содержаниями Li₂O, для которых уже имеется технология их переработки. Разработка гидроминерального Знаменского месторождения требует проведения комплекса технологических исследований, которые необходимо активизировать.

В целях эффективного освоения МСБ и производства материалов высоких технологий необходимо:

— последовательное импортозамещение отечественным сырьем при производстве металлов высоких технологий;

— геолого-экономическая переоценка разведанных объектов с целью определения первоочередных для освоения;

— усиление технологических исследований в области переработки минерального сырья для производства высокотехнологичных материалов;

— повышение активности государственных органов и компаний в экспортном продвижении на мировой рынок отечественных концентратов и продуктов их переработки с высокой добавленной стоимостью;

— разработка проектов государственного партнерства в горно-обоганительной деятельности и производстве материалов для высоких технологий на отечественном минеральном сырье.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Архангельская, В.В.* Геологическое строение и минералогия месторождений тантала России / В.В. Архангельская, В.В. Рябцев, Т.Н. Шурига // Минеральное сырье. — № 26. — М.: ВИМС, 2012. — С. 191.
2. *Бортников, Н.С.* Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития / Н.С. Бортников, А.В. Волков, А.Л. Галямов, И.В. Викентьев, В.В. Аристов и др. // Геология рудных месторождений — 2016 г. — Т. 58. — № 2. — С. 97–119.
3. *Быховский, Л.З.* Редкоземельное и скандиевое сырье России / Л.З. Быховский, С.Д. Потанин, Е.И. Котельников и др. // Минеральное сырье. — № 31. — М.: ВИМС, 2016 г. — 217 с.
4. *Быховский, Л.З.* Рудная база редких металлов России / Л.З. Быховский, Н.А. Архипова // Горный журнал. — 2017. — № 7. — С. 4–9.
5. *Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов РФ в 2016 и 2017 годах* / Гл. редактор Е.А. Киселев. Министерство природных ресурсов и экологии РФ. — М., 2018. — 370 с.
6. *Куприянова, И.И.* Бериллиевые месторождения России / И.И. Куприянова, Е.П. Шпанов. Науч. ред. В.И. Коваленко. Отв. ред. Г.А. Машковцев, ВИМС. — М.: ГЕОС, 2011. — 353 с.
7. *Курков, А.В.* Современные технологии освоения минерально-сырьевой базы лития / А.В. Курков, Л.Г. Лихниевич, С.И. Ануфриева, Т.Д. Онтоева, А.А. Рогожин, Н.А. Пермьякова // Минеральное сырье. — № 35. — М.: ВИМС, 2018. — С. 74.
8. *Машковцев, Г.А.* Перспективы освоения и развития минерально-сырьевых баз критических ТПИ / Г.А. Машковцев, Ю.А. Хижняков, Д.С. Козловский, В.Ю. Самойлов, А.А. Фатеева // Разведка и охрана недр. — 2017. — № 2. — С. 3–10.
9. *Ниобиевые, танталовые руды и редкоземельные элементы. Методические рекомендации по применению Классификации запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых.* — М., 2007.
10. *Рябцев, В.В.* Танталовые руды России: состояние и перспективы освоения минерально-сырьевой базы / В.В. Рябцев, Л.Б. Чистов, Т.Н. Шурига // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. — № 21. — М.: ВИМС, 2006. — С. 92.
11. *Годовой отчет ОАО «Соликамский магниевый завод» за 2018 год.* http://смз.рф/raport/2019/sob_акс1/2019_05_28_godovoj_otchet_smz_2018_final_s_prilozh.pdf
12. *Brian Leni.* The lithium supply and demand story. <http://www.mining.com/web/lithium-supply-demand-story>
13. *Gupta, C.K.* Extractive Metallurgy of Rare Earths. Second Edition / C.K. Gupta, N. Krishnamurthy. — Taylor & Francis Group, LLC., 2016. — 869 p.
14. *Jin, Yang* China's ion-adsorption rare earth resources, mining consequences and preservation. Environmental Development / JinYang, AijunLin, Xiao-LiangLi, YidingWu, WenbinZhou, ZhanhengChene. — Vol. 8, October 2013. — P. 131–136.
15. *Lithium 101.* Deutsche Bank Markets Research. 2016.
16. *Lithium.* Definitions, mineralogy and deposits. British Geological Survey. June 2016.
17. *Mt Weld,* Western Australia. Lynas Corp. <https://www.lynascorp.com/Pages/Mt-Weld-Concentration-Plant.aspx>.
18. *Philip, L. Verplanck* Rare Earth and critical elements in ore deposits / Philip L. Verplanck, Murray W. Hitzman. — Reviews in Economic Geology. — Vol. 18 — 2016. — 365 p.
19. *Research on the exploitation status and potential of lithium resources in China.* www.metalchina.com/2017/lithium.pdf.
20. *Beryllium.2019.* USGS. Mineral Commodity Summaries. https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/rare_earths/mcs-2019-raree.pdf.
21. *Tantalum-Niobium International Study Center.* <https://tanb.org/about-niobium>.
22. *Mineral Commodity Summaries 2019.* <https://www.usgs.gov/centers/nmic>.
23. *USGS. Beryllium — A Critical Mineral Commodity — Resources, Production, and Supply Chain.* 2016 <https://pubs.usgs.gov/fs/2016/3081/fs20163081.pdf>.

© Машковцев Г.А., Быховский Л.З., Онтоева Т.Д., 2020

Машковцев Григорий Анатольевич // vims@vims-geo.ru
Быховский Лев Залманович // lev@vims-geo.ru
Онтоева Татьяна Дмитриевна // ontoeva@vims-geo.ru