

УДК 553.493.5

КРИТИЧЕСКОЕ И СТРАТЕГИЧЕСКОЕ МИНЕРАЛЬНОЕ СЫРЬЕ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

© 2023 г. И. В. Викентьев*

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

*E-mail: viken@igem.ru

Поступила в редакцию 25.05.2023 г.

После доработки 05.06.2023 г.

Принята к публикации 11.06.2023 г.

Мировое развитие и научно-технический прогресс интенсифицируют использование минерального сырья (МС) — необходимой основы производства высокотехнологичной продукции. Передовые страны-производители этой продукции остро нуждаются в различных сырьевых материалах, которые являются критически значимыми и, как правило, поставляются из третьих стран. Стратегическим является минеральное сырье, имеющее особое значение для обеспечения экономического развития страны, ее обороны и безопасности. В связи со сложной структурой добычи, переработки и потребления сырья многие его виды являются дефицитными. В мировой литературе понятию “дефицитное МС” по своему содержанию наиболее близко соответствует “критическое МС”, то есть сырье, критически необходимое для промышленности и характеризующееся значительным риском своих поставок. Большинство видов критического сырья необходимо для производства перспективной высокотехнологичной промышленной продукции и новых материалов и, в особенности, — для “зеленых технологий” в связи с активно проводимым мировыми державами курсом декарбонизации экономики. В сфере производства такой продукции быстро нарастает потребление МС, особенно — редкоземельных элементов (РЗЭ), V, Li и элементов платиновой группы (ЭПГ). Из перечня 61 вида стратегического для России МС добыча нефти, газа, Cu, Au, ЭПГ, Ni, апатитовых руд, K-солей и алмазов (как и не входящих в этот перечень углей, Fe-руд, Na-солей, V, В-руд, магнетита, хризотил-асбеста) полностью обеспечивает их текущее внутреннее потребление в РФ и достигнутый уровень экспорта. Дефицитными являются U, Mn- и Cr-руды, Zr, особо чистое кварцевое сырье (SiO₂), бокситы (Al), графит, флюорит и не входящие в число стратегических барит, каолин, бентонит; их добыча лишь частично обеспечивает внутреннее потребление, во многом зависящее от импорта; она ведется в недостаточных объемах при наличии значительных запасов в недрах, обладающих относительно низким качеством. Наиболее дефицитными в указанном перечне являются Ti, Li, Ta, Nb, РЗЭ (обычно выделяют группы тяжелых и легких редких земель, HREE и LREE соответственно): их отечественное потребление обеспечивается, главным образом, за счет импорта при весьма ограниченной добыче (несмотря на крупные запасы, в т.ч. низкокачественных руд). К критическому МС в РФ следует отнести Re, Be, Nb, Ta, HREE, Y, Sc, LREE, Ge, Ga, Li, Hf, Co, а из не стратегического МС — Bi и Sr. Важнейшим источником рассеянных/попутных элементов является сырье горнорудных предприятий цветной металлургии: Cu- и Zn-подотраслей — In, Ge, Ga, Cd, Tl, Se, Te, Sb, Bi и др.; Al-подотрасли — Ga; для Au и Au-Ag месторождений — Sb, As, Te, Se, Bi, Tl. Попутным источником лития являются рассолы газоконденсатных месторождений. Вопросы оценки комплексного сырья для высокотехнологичной индустрии рассмотрены на примере колчеданных, порфириновых и золоторудных месторождений Уральской складчатой области, играющих важную роль в ее общем металлогенетическом потенциале.

Ключевые слова: минеральное сырье, высокотехнологичная индустрия, критические металлы, рассеянные элементы, попутные компоненты, рудные месторождения

DOI: 10.31857/S0016777023050106, EDN: WBBSSR

ВВЕДЕНИЕ

Понятие “критическое минеральное сырье” (critical minerals), появившееся на рубеже веков, в настоящее время прочно утвердилось в экономических ведущих промышленно развитых и бурно раз-

вивающихся стран (Critical metals ..., 2014; Бортников и др., 2016). Оно обозначает практически незаменимый для новейших промышленных технологий материал, крайне рискованный в своем получении потребителем (Minerals ..., 2008; Rare

Earth ..., 2016; Еремин, 2020; Marscheider-Weidemann et al., 2021).

Проблема обеспечения минерально-сырьевыми ресурсами является одной из ключевых на протяжении всей истории человечества. За обладание ими велись войны, а особое значение обеспеченность минеральным сырьем приобретает при обострении международной ситуации, во время экономических и настоящих войн (Ферсман, 1941; Бортников и др., 2022).

СТРАТЕГИЧЕСКОЕ, КРИТИЧЕСКОЕ И ДЕФИЦИТНОЕ МИНЕРАЛЬНОЕ СЫРЬЕ

Человечество использует все большее число металлов во все возрастающем количестве, при насущной необходимости в бесперебойном их снабжении, особенно это касается минерально-сырьевой базы (МСБ) производства перспективной высокотехнологичной промышленной продукции и новых материалов (зачастую называемой “перспективной МСБ”); к соответствующим отраслям производства относятся: ракетно-космическая и атомная промышленность, авиа- и приборостроение, радиоэлектроника, производство аккумуляторных батарей и некоторые другие (Бортников и др., 2016; Темнов, 2019). Например, если рассматривать общемировую добычу аккумуляторного и энергетического минерального сырья, она с годами сильно растет, даже если ее нормировать на душу населения (фиг. 1). На данной диаграмме отдельно показаны, с одной стороны, металлы и минералы, добываемые преимущественно как основной компонент руд (фиг. 1а), а с другой – химические элементы, извлекаемые преимущественно *попутно* при обогащении руд (фиг. 1б); эти элементы обычно именуются рассеянными элементами.

Среди разведываемого и добываемого минерального сырья большая группа относится к стратегическим видам. *Стратегическим* является минеральное сырье (МС), наличие/отсутствие которого имеет особое значение для обеспечения экономического развития страны, ее обороны и безопасности. Перечень такого сырья и материалов устанавливается правительством и может меняться в зависимости от следующих факторов:

- военно-политических и экономических приоритетов государства,
- структуры материального производства и прогнозов его развития,
- конъюнктуры мирового рынка,
- состояния внешнеэкономических связей и др.

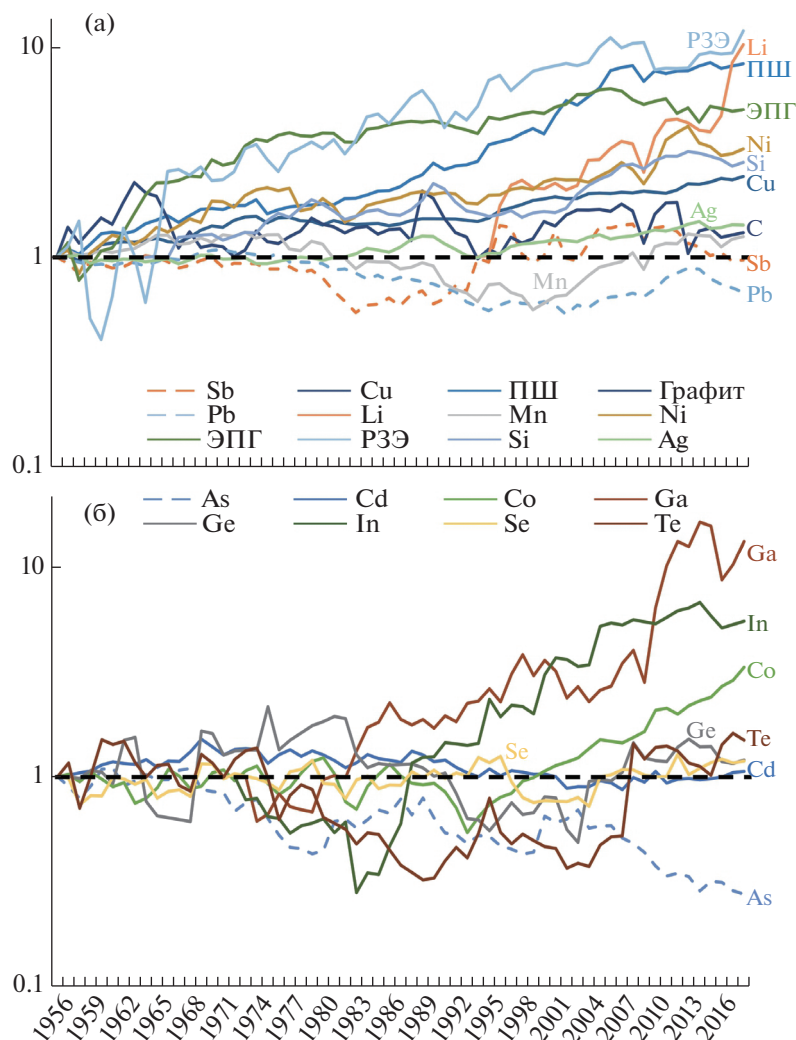
В связи со сложной структурой добычи, переработки и потребления сырья многие его виды являются дефицитными. Это понятие понимается по-разному. Понятие *дефицитное МС* в отече-

ственной литературе имеет весьма широкое толкование, включающее в различных случаях:

- востребованность для различных производств;
- ограничения в снабжении производственного комплекса страны – от уровня отдельного крупного предприятия до отрасли в целом, в обзорной или долгосрочной перспективе;
- необходимость импорта этого сырья и др.

В зарубежной литературе понятию дефицитное МС по своему содержанию наиболее близко соответствует, так называемое, “*критическое МС*”, т.е. минеральное сырье, практически незаменимое для новейших промышленных технологий, которое характеризуется значительным риском своих поставок. Понятие критическое минеральное сырье (далее – критическое сырье) полностью оформилось в 2007–2010 гг., когда Китай, добывающий 95% мирового объема редкоземельных металлов, сначала ввел систему квот на экспорт РЗЭ, летом 2010 г. резко их снизил, а осенью остановил поставки РЗЭ сначала Японии, а затем – Соединенным Штатам и странам Европы. Таким образом, страны Запада ярко осознали свою болезненную зависимость от поставок отдельных видов минерального сырья.

В мае 2011 г. на рассмотрение Сената США внесен Акт политики критического недропользования, имеющий целью уменьшить зависимость от иностранных поставщиков и, таким образом, защитить американскую экономику. Этот Акт был принят и окончательно утвержден в 2013 г. В феврале 2020 года Геологическая служба США (USGS) опубликовала новую методологию оценки глобального предложения и спроса в США на 52 вида минерального сырья за 2007–2016 годы. В ней были определены 23 вида минерального сырья, включая Al, Sb, Bi, Co, Ga, Ge, In, Nb, ЭПГ, РЗЭ, Ta, Ti и W, которые представляют наибольший риск поставок для производственного сектора США (Nassar, Fortier, 2021). В настоящее время (по оценке за 2016–2019 гг.) США находятся в 100% зависимости от зарубежных поставок по 17 видам МС. Их импорт осуществлялся из 21 страны, как правило, из 2–3 стран (за исключением Канады, которая по двум позициям была единственным поставщиком), и более чем в 50% зависимости еще по 29 видам МС. Интересно, что за 10 лет (с 2010 по 2020) США удалось преодолеть преобладающую зависимость по 15 позициям по сырью, которое ранее преимущественно обеспечивалось зарубежными поставками. Россия остается ключевым поставщиком для США по 15 позициям: Pd, U, Nb, Zr, Sc, Ge, Li, Ni, Cr, Mg (металлич.), алмазы, асбест, абразивы (корунд), поташ K_2CO_3 , кремний (металлический и ферросилиций). В США идет целенаправленная работа по снижению зависимости от импорта и



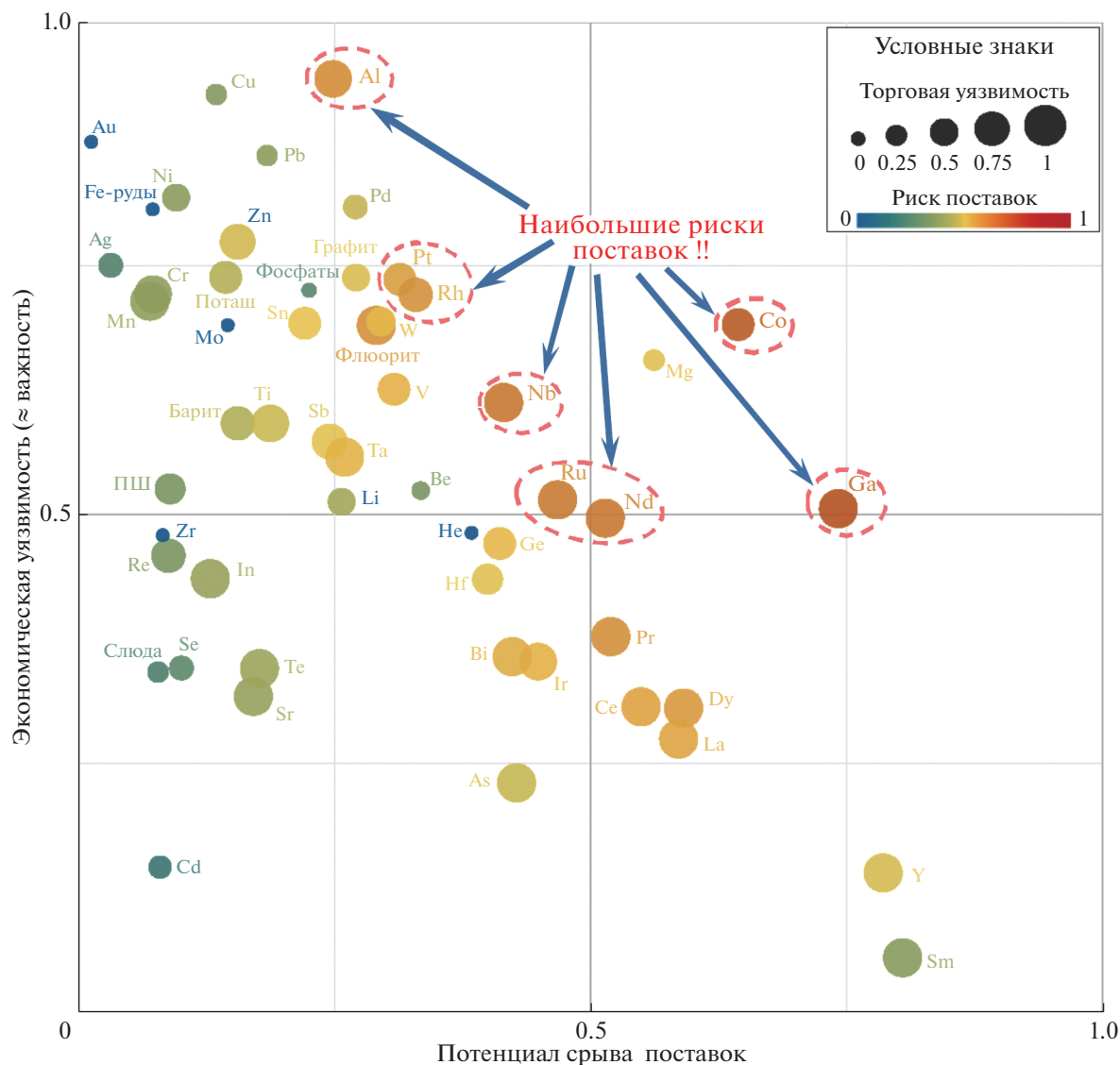
Фиг. 1. Мировая добыча аккумуляторных и энергетических металлов и неметаллов, нормализованная к 1956 г. (или самой ранней доступной дате – для галлия (1978), германия (1957) и индия (1972)) на душу населения, с разбивкой данных по металлам и минералам, производимым в качестве основного и сопутствующего продукта (а) и преимущественно в качестве сопутствующих продуктов (б). На основе данных из обзора (Jowitt, McNulty, 2021). Данные Геологической службы США о глобальном производстве цезия и рубидия отсутствуют. С – графит, ПШ – полево шпат. Пунктирной линией обозначены сурьма, свинец и мышьяк (добыча на душу населения не растет).

совершенствованию механизмов определения критичности того или иного сырья. Сейчас наиболее рискованными считаются поставки бокситов, платиноидов, кобальта, галлия и ниобия (фиг. 2). Если сконцентрироваться на “зеленых” низкоуглеродных технологиях, к дефицитам США добавятся P3Э – они используются в морских ветрогенераторах и двигателях электромобилей; Li, Co и Ni высокой чистоты – в технологиях хранения энергии; Ge – в полупроводниках.

Большинство видов критического сырья остро необходимы для производства высокотехнологичной продукции и, в особенности, – для “зеленых технологий” в связи с активно проводимой политикой декарбонизации экономики (фиг. 3). К важнейшим компонентам перехода к низко-уг-

леродным энергетике и транспорту относятся: (1) солнечная фотовольтаика, (2) ветряные турбины, (3) водородная энергетика, (4) электромобили (Jowitt, McNulty, 2021). На схеме (фиг. 3), помимо этих четырех, самых “зеленых” отраслей, показан ряд других, в основном смежных; всем им необходимы, помимо распространенных металлов, целый ряд редких элементов. Ядерная энергетика многими, но далеко не всеми, рассматривается как самая чистая, поэтому она на данной схеме отнесена к “зеленым” отраслям с долей условности.

Объем мирового рынка продукции, критически зависимой от редких металлов, оценивается на сумму не менее 4 трлн долл. (Abraham, 2017). Согласно перспективному анализу, на следующие два десятилетия ожидается бурный рост по-



Фиг. 2. Новый вариант оценки критичности минерально-сырьевых ресурсов экономики США, проведенной Геологической службой страны (Nassar, Fortier, 2021). Красными тонами выделены элементы с наибольшими рисками поставки.

требления в высокотехнологичной сфере: по четырем элементам La, Y, Pt, Ir – в 1000 и более раз, по V – в 200 раз, по Li, Ru и HREE – в 10 и более раз (табл. 1) (Marscheider-Weidemann et al., 2021).

ДЕФИЦИТНОЕ И СТРАТЕГИЧЕСКОЕ СЫРЬЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Важно определиться в соотношениях между понятиями стратегическое (*strategic*) и дефицитное (*critical*) МС: обычно они являются взаимодополняющими, но не всякое стратегическое минеральное сырье является дефицитным и наоборот. Для каждой страны перечень индивидуальных видов МС в этих категориях различен. Для РФ в настоящее время: (1) U, Mn, Cr, Ti и флюорит – и стра-

тегическое, и дефицитное МС; (2) Cu, Ni и Co – стратегическое, но не дефицитное МС; (3) барит $BaSO_4$ – остро дефицитное, но не стратегическое МС. Для экономики, например, Казахстана все эти 9 видов МС (U, Mn, Cr, Ti, Cu, Ni, Co, $BaSO_4$ и CaF_2) не являются дефицитными; более того, по ресурсам/запасам некоторых из них эта страна входит в число мировых лидеров.

До недавнего времени действовал старый перечень стратегического МС (фиг. 4). Сейчас список основных видов *стратегического* МС расширен (перечень утвержден 30 августа 2022 г.). Новый Перечень включает 61 вид МС: нефть, природный газ, бокситы, алмазы, графит, апатитовые руды, соли калийные, плавиковый шпат,

Направления	Технологии/продукты	Металлы, минералы	Высокотехнологичные металлы	
Производство энергии	Фото-вольтаика	Солнечная энергетика	Cu, Zn, ПШ, Si (Al, B, P)	Ge, Cd, In, Ga, Te, Se, Ag, As, Sc, Cs, Rb, (Bi)
	Зеленая энергетика	Ветровые турбины	Cu, Ni, Zn, Fe, B, Cr, Mn, Mo	РЗЭ (Nd, Dy, Pr, Tb), Co
		Водородная энергетика; топливные элементы	Cu	ЭПГ, Y, Zr, Sc
		Ядерные реакторы	Cr, Mn, Ni, Cu, Mo	U, Th, Zr
Батарейные металлы	Аккумуляторы, электробатареи	Cu, Ni, Pb, As, Mn, графит	Li, Cd, Co, In, Sb, РЗЭ (Nd, Dy, La, Ce, Pr), Cs, ЭПГ (Pt, Pd, Rh), Ag	
Транспорт	Электромобили, (+ гибридные), электродвигатели	Cu, Fe	Li, Co, РЗЭ (Pr, Nd, Dy, Tb), ЭПГ (Pd, Rh)	
	Мощные магниты	Cu, Fe, B	РЗЭ (Nd, Dy, Pr, Tb), Co	

Фиг. 3. Химические элементы и минералы, использование которых критически важно для обеспечения перехода к низко-углеродным энергетике и транспорту, с учетом данных (Бортников и др., 2022). ПШ – полевой шпат, РЗЭ – редкоземельные элементы, ЭПГ – элементы платиновой группы. Жирным шрифтом выделены наиболее важные элементы.

особо чистое кварцевое сырье, подземные воды и еще 51 химический элемент (фиг. 5). Из этого перечня добыча в стране нефти, газа, Cu, Au, ЭПГ, Ni, апатитовых руд, К-солей и алмазов (как и не входящих в этот перечень углей, Fe-руд, Na-солей, V, В-руд, магнезита, хризотил-асбеста) полностью обеспечивает их текущее внутреннее потребление в РФ и достигнутый уровень экспорта; *дефицитными* являются U, Mn- и Cr-руды, Zr, особо чистое кварцевое сырье (SiO₂), бокситы (Al), графит, флюорит и не входящие в указанный перечень барит, каолин, бентонит; их добыча лишь *частично обеспечивает внутреннее потребление*, во многом зависящее от импорта; их добыча ведется в недостаточных объемах при наличии значительных запасов, обладающих относительно низким качеством; *наиболее дефицитными* в указанном перечне являются Ti, Li, Ta, Nb, РЗЭ – их отечественное потребление обеспечивается, главным образом, за счет импорта при весьма ограниченной добыче (несмотря на крупные запасы, в т.ч. низкокачественных руд).

Проблема критического сырья (critical minerals) в приложении к экономике России была поднята Н.И. Ереминым (2012), которым был подготовлен соответствующий специальный курс для высшей школы. В относительно законченном виде, отражающем ситуацию 2010 г., она нашла свое

отражение в электронном учебнике (Еремин, 2020). В обсуждение проблемы стратегического/критического сырья вовлечены многие министерства и ведомства, а также крупные госкорпорации; организация **научного и экспертного обеспечения** воспроизводства минерально-сырьевой базы, переработки сырья и выпуска новых материалов возложена на РАН (Бортников и др., 2016; Темнов, 2019).

ЭКСПОРТ И ИМПОРТ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

В России достаточно освоенные МСБ и развитые производственные мощности (добывающие и перерабатывающие) по нефти, газу, Cu, Ni, Co, Au, ЭПГ, алмазам (C), апатитам (P), К-солям предопределяют крупномасштабный **экспорт** этих высоколиквидных, *стратегических* видов МС, как и *нестратегических* – угля, Fe-руд, хризотил-асбеста. При недостаточно освоенных (для Al) или практически неосвоенных (для Ti) МСБ, но развитых производственных мощностях переработки сырья *экспортируются* и Al, и стратегический Ti. Кроме них вывозится также Pb, многие редкие и рассеянные элементы (*стратегические*) и другие *дефицитные* виды сырья с недостаточно освоенной сырьевой базой и относительно неразвитыми про-

Таблица 1. Проанализированный глобальный спрос в мире на сырье в связи с новыми технологиями в 2018 и 2040 гг., на основе (Marscheider-Weidemann et al., 2021).

Металл	Производство сырья 2018, т	Спрос 2018, т	Рост спроса к 2040 (×) ¹
		со стороны новых технологий	
La	36 тыс.	2.1	570–19000 [×]
Pt	190	0.11	600–7500 [×]
Ir	6.8	0.01	200–3400 [×]
Y	7600	2.7	600–1700 [×]
V	91 тыс.	320	190–220 [×]
Li	95 тыс.	7500	11–75 [×]
Графит	1.2 млн	22 тыс.	9–45 [×]
Ru	33	12	7–53 [×]
HREE*	1300	850	8–10 [×]
Co	130 тыс.	50 тыс.	3–10 [×]
Sc	9.1	5	1.2–14 [×]
LREE**	31 тыс.	10 тыс.	6–7 [×]
Ge	140	59	4–5 [×]
Ta	1800	1200	2–3 [×]

Примечание. ¹ Указана кратность роста спроса на указанное сырье в высокотехнологичных отраслях к 2040 г. по отношению к оцененному в 2018 г.; *HREE (Dy + Tb); **LREE (Ce + Nd + Pr).

изводственными мощностями. **Не экспортируются** лишь Be, Re, Hf (стратегические) и Ti.

Важнейшими **импортируемыми видами** МС являются: Mn, Cr, глинозем (*стратегические*); высококачественный каолин и бентонит (*дефицитные*) – потребность в них отечественной экономики в обозримом будущем не может быть обеспечена за счет собственной МСБ (преобладающий *фактор “естественного дефицита”*). В настоящий период и на ближайшую перспективу “импортозависимыми” твердыми полезными ископаемыми в РФ являются уран, марганец, хром, титан, бокситы, цирконий, бериллий, литий, рений, редкоземельные металлы.

Недостаточная освоенность отечественной сырьевой базы U, Ti, Zr, редких элементов, ряда других видов МС диктует необходимость их импорта для покрытия существующего дефицита в ближайшие годы (преобладающий *фактор “управляемого дефицита”*). В то же время, наряду с импортом дефицитного МС, по ряду элементов идет их же встречный экспорт: вывозятся U (ТВС), Ta, Nb, Li, Zr, РЗЭ, Sr, Cs, Rb, Ge, Bi. Как правило, за рубеж продают *концентраты*, а ввозят немного, но на порядок (≈) более дорогие *металлы*. Исключением являются Li (ввозят концентраты для их переработки по толлингу) и уран (2/3 урана ввозится; экспортируются тепло выделяющие сборки, ТВС).

По данным Счетной Палаты (май 2021 г.), в 2018–2020 гг. в РФ импортировалось более трети стратегических видов минерального сырья и око-

ло 2/3 дефицитных видов полезных ископаемых. По ее оценкам и по данным ВИМСа (Государственный доклад..., 2022), потребности экономики России в Mn, Cr, Ti, Zr и Li полностью обеспечивались за счет импорта, а также по РЗЭ – на 99.7%, по Nb – 99%, по Ta – 60% (табл. 2), по Mo – 41%, по W – 18%.

Таким образом, к критическому МС в РФ можно отнести сравнительно небольшой список элементов (Бортников и др., 2016). С учетом приведенных данных он может быть сформулирован в таком виде (табл. 3), в этой таблице для сопоставления приведены сегодняшние оценки переработки КС стран ЕС и США.

КРИТИЧЕСКОЕ И СТРАТЕГИЧЕСКОЕ СЫРЬЕ НА ПРИМЕРЕ УРАЛА

Рудное сырье Урала является важным источником получения редких элементов и благородных металлов, включая многие относимые к разрядам стратегических (для РФ) и критических для экономик разных стран. В их числе – Au, Ag, Co, Ni, Mo, In, Ga, Te, Se, Ge, Sb, Re, ЭПГ. Часть этих элементов получают на металлургических предприятиях Урала при переработке медного и цинкового концентратов (Au, Ag, Co, Ni, In, Te, Se), но учитываются только Au и Ag; другие – если и получают, содержание их в добытых рудах и полученных концентратах не учтено (Mo, Sb, In, Ga, Sn, Ge, Re, ЭПГ). В то же время большинство их входит в разряд *high-tech* элементов и имеет осо-

Н																	He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr	
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
Cs	Ba	La—Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
Fr	Ra	Ac—Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og	
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	Nb	Lr		

В минералах и сырье

алмазы, графит

бокситы, о.ч.к.

Фиг. 4. Основные виды стратегического МС в РФ (соответствующие клетки выделены заливкой). Ранее действующий перечень, утвержденный распоряжением Правительства РФ 16.01.1996 г. Здесь и на фиг. 5: о.ч.к. — особо чистый кварц.

бое значение для обеспечения ускоренного экономического развития страны и укрепления ее обороноспособности.

Несмотря на нарастающий дефицит местного рудного сырья, уральский промышленный комплекс продолжает производить 40% российской

Таблица 2. Зависимость России от импортных поставок некоторых редких металлов (по данным ФГБУ «ВИМС»)

Вид/группа редких металлов	Обеспечение потребности*, %	
	за счет собств. добычи	за счет импорта
Тантал	40	60
Ниобий:		
для химической промышленности	100	—
для металлургии	2	98
Литий	—	100
РЗЭ	0.3	99.7
Титан:		
для химической промышленности	—	100
для металлургии	7	93
Цирконий:		
для химической промышленности	—	100
для производства керамики	—	100

Примечание. *По видимому потреблению.

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La–Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac—Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og

La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	Nb	Lr

Фиг. 5. Основные виды стратегического МС в РФ (соответствующие клетки выделены заливкой). Перечень утвержден распоряжением Правительства РФ от 30 августа 2022 г. Добавленные в 2022 г. металлы показаны красным цветом.

стали и проката черных металлов и 45% стальных труб. Здесь действуют, расширяя производство, сотни горнорудных компаний, крупнейшие в стране предприятия цветной металлургии и большинство основных оборонных предприятий РФ. Это исторически было обусловлено тем, что Уральский ороген является одним из крупнейших рудных поясов в мире. Его металлогенический потенциал включает: 20 млрд т железных руд, в том числе 170 млн т TiO_2 и 22 млн т V_2O_5 ; 450 млн т хромитов; 3.6 млрд т руд цветных металлов, в том числе 41 млн т Cu, 35 млн т Zn, 2.6 млн т Pb; 3800 т Au (500 т в россыпях), 37 тыс. т Ag; 615 т платиноидов (475 т в россыпях).

К эндогенным рудным залежам **стратегического сырья** на Урале относятся месторождения Cr, Ti, Cu, Pb, Mo, W, Sn, Zr, Ta, Nb, Co, Sc, Be, Sb, Ge, Re, Au, Ag, ЭПГ, ОЧК (SiO_2), из которых образуют собственные крупные объекты и поэтому прежде всего являются особо важными — медь и золото. Соответствующие месторождения, кроме упомянутых двух металлов, обладают крупными или значительными запасами и других элементов из названного списка: колчеданные (кроме Cu — это Au, Ag, Pb, Co, Sb, а содержания Sn, Ge, Re и ЭПГ не учтены, хотя ЭПГ и Re извлекаются);

меднопорфировые (кроме Cu — это Au, Ag, Mo, Re, Co, Sb, но содержания Re, как и ЭПГ в основном не учтены) и золоторудные (кроме Au — это Ag и неучтенные Sb и ЭПГ). Вне упомянутого списка — **критические** для многих мировых экономик элементы: Te, Se, Tl, Ga; их ресурсы не оценены, хотя на предприятиях цветной металлургии Урала извлекаются большие количества Ga (в основном из бокситов), а также Te и Se (медная, цинковая подотрасли) в крупных объемах, соизмеримых только с их получением на сульфидных Cu–Ni месторождениях корпорацией Норникель.

Получены минералого-геохимические данные по ключевым гидротермальным месторождениям (Викентьев и др., 2020б; Vikentyev et al., 2021 и др.), включая данные по присутствию собственных минералов Au, Ag, Mo, Sn, Sb, ЭПГ, Re и их примесей в рудообразующих сульфидах (PCMA и LA-ICP-MS). Наиболее актуальной, применительно к Уралу, является проблема более полного комплексного использования рудного сырья, поскольку преобладающая часть благородных металлов (прежде всего, ЭПГ, а для многих объектов — также Au и Ag), редких и рассеянных элементов (Re, Ge, Mo, Sb, Pb, Co) при обогащении руд теряется.

Таблица 3. Критическое минеральное сырье по оценкам экспертов США, ЕС и России (на конец 2022 г.)

	США		ЕС	Россия	
Важнейшие PЗЭ:	Ga	Не оценивался U	Sb	Re	
	Nb		Флюорит	Be	
	Co		Mg	Nb	
	Nd		Ru	Si	Ta
	Dy		Rh	Барит	HREE
	Pr		Al	Ga	Y
	Ce		Флюорит	Графит	Sc
	La		Pt	Ta	LREE
	Y		Ir	Бокситы	Ge
	Sm		Bi	Ge	Ga
др. PЗЭ: ≈Er* ≈Eu* ≈Gd* ≈Ho* ≈Lu* ≈Tb* ≈Tm* ≈Yb*	Sb	Отнесение к критическим минералам требует дополнительной оценки (м.б. пересмотрено)	Ti	Li	
	Ta		Be	Hf	
	Hf		Hf	Co	
	W		Nb		
	V		V	Ti?	
	Sn		Bi	Zr?	
	Mg		HREE	Rb?	
	Ge		PGM	Cs?	
	Pd		W	In?	
	Ti		Бораты		
	Zn		In		
	Графит		Sr	<i>He</i> <i>стратегические:</i>	
	Cr		Co		
	As		Li	<i>Bi</i>	
	Барит		LREE	<i>Sr</i>	
	In		Sc		
	Mn				
	Li				
Te	≈Cs*				
Ni	≈Rb*				
Be	≈Sc*				
Zr					

Примечание. *Качественная оценка; критические виды минерального сырья для России приведены по (Бортников и др., 2016), с уточн.; данные для США – по (Nassar, Fortier, 2021).

РЕДКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ В МЕСТОРОЖДЕНИЯХ РФ И ПРОБЛЕМЫ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

Практически по всем редким элементам, *кроме Sc, Bi и Re*, недра России содержат колоссальные запасы (табл. 4) (Быховский и др., 2015; Темнов, 2019). Так, геолого-промышленные типы Ta–Nb месторождений России включают: **Ta** – *редкометальные пегматиты* (Завитинское, Вишняковское) и *танталоносные редкометальные граниты* (Орловское, Этыкинское, Вознесенское); **Ta–Nb** – *редкометальные щелочные граниты* (Катугин,

Улуг-Танзек) и *лопаритоносные агнаитовые нефелиновые сиениты* (Ловозерское); **Nb** – *карбонатитовые* (Томтор) и *коры выветривания* по карбонатам (Томтор). Самые разнообразные месторождения включают крупные концентрации бериллия (табл. 5), однако он в РФ нигде не добывается.

В то же время получение большинства редких элементов в виде продуктов в стране или отсутствует, или минимально. Система госрегулирования и управления их ресурсами, особенно – рассеянных элементов, не нацелена на их вовлече-

Таблица 4. Место России* в общемировых рейтингах стран с крупнейшими запасами разных редких элементов

Место по запасам соответствующего элемента	Редкие элементы
1 место	Ta, Sr, In, Cd, Rb, Se, Te, Tl
2 место	Nb, REE, V, Ge, Cs
3 место	Li, Zr, Be, Bi, Ga, Hf

Примечание. * Оценочные данные Минприроды, приведенные в работе (Темнов, 2019).

ние в высокотехнологические отрасли РФ. По данным Минприроды, производство товарных продуктов (P3Э, Nb, Ta, Zr, Ge) из множества разрабатываемых **собственно редкометалльных** месторождений идет только на двух – Павловском (Ge) и Ловозерском (P3Э, Nb, Ta, Zr – в небольшом количестве и при далеко неполном извлечении). В то же время проблема с редкими элементами – острейшая. По оценкам ВИМСа, их подавляющее количество, обеспечивающее промышленные нужды РФ, ввозится в страну (табл. 2). При этом запасы сырья и рентабельные технологии их освоения имеются, например, для наиболее критического металла в РФ – рения (Викентьев и др., 2020а; Кайлачаков и др., 2020).

Стратегия развития металлургии до 2030 г., которая подготовлена Минпромторгом РФ, ставит задачу импортозамещения редких металлов. Проблема добычи редкометалльного сырья и получения из него конечных продуктов решается, но крайне медленно. Например, лишь в конце 2022 г.

намелись позитивные сдвиги в обеспечении отечественным сырьем создаваемой литиевой промышленности: в обозримом будущем будет решена задача по добыче руд для получения лития – важнейшего батарейного металла. Она разворачивается в России на 5 месторождениях: Колмозерском, Полмостундровском в Мурманской области, Завитинском – в Забайкалье (из редкометалльных руд), а также на газоконденсатных месторождениях Ковыктинском и Ярактинском в Иркутской области (из пластовых рассолов).

ПРОБЛЕМА ПОПУТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Согласно обзору, подготовленному Евросоюзом (Metals for Clean Energy..., 2022), в мире 7 элементов добываются только попутно: **Cd** (при переработке руд и концентратов Zn, Cu, Pb), **Ge** (Zn), **In** (Zn, Cu), **Ga** (Al, Zn), **Te** (главным образом, электролитическое рафинирование Cu), **Ir** (Pt и Pd), **Sc** (руды Fe, Ti, P3Э, Zr, Ni, U, W или хвосты их обогащения). Кроме того, для пяти металлов указывается их преобладающее попутное извлечение: 84% **Pb** (производство Zn, Ag, Au, Cu, Sb), 70% **Ag** (Zn, Pb, Cu), 60% **Mo** (Cu), а также **V** и **Pd**.

В России в настоящее время в качестве **попутных** ряд редких элементов (Zr, V, Ga, Cd, Se, Te) в минимальных количествах извлекаются при переработке руд 24 месторождений, где учтены их запасы, а на 37 – теряются безвозвратно (Темнов, 2019; Государственный доклад ..., 2022). Наиболее слабо проработана проблема *рассеянных элементов руд* месторождений (Левченко, Ключарев, 2014; Schwarz-Schampera, 2014; Гаськов и др.,

Таблица 5. Распределение запасов бериллия по промышленным типам месторождений, по материалам работы (Куприянова, 2016)

Промышленный тип	Доля запасов, %		C _{BeO} , мас. %	Примеры месторождений
	В мире	В РФ		
Бернтрандит-аргиллизитовые метасоматиты	21	–	0.6–1.5	Спер-Маунтин (США)
Бертрандит-фенакит-флюоритовые метасоматиты	–	11.5	0.2–1.2	Ермаковское, Ауник (Россия)
Бериллиеносные полевошпатовые метасоматиты	6	–	0.3–1.4	Тор-Лейк (Канада), Пержанское (Украина)
Берилл-слюдяные метасоматиты	25	26	0.12–0.75	Малышевское, Боевское (Россия)
Апокарбонатные редкометалльно-флюоритовые метасоматиты	–	12	0.1–0.3	Вознесенское, Пограничное (Россия)
Комплексные (Be, W, Mo) кварцевожильные	–	2.5	0.05–0.3	Кара-Кульское, Казандинское (Россия)
Редкометалльные пегматиты	48	48	0.03–0.3	Завитинское, Колмозерское (Россия)

2017; Левченко и др., 2018; Темнов, 2019; Галлий ..., 2020), в основном обрабатываемых предприятиями цветной металлургии – In, Ge, Ga, Cd, Tl, Se, Te, (Sb, Bi и др.), а также, в меньшей степени значимые рассеянные формы элементов, находящиеся в минеральном сырье черной металлургии, сырье энергетической и нефтехимической сфер производства. Учет их, по существу, не налажен: идет лишь формально, зачастую в полном отрыве от реальности. Как правило, продукты не анализируются по производственной цепочке, включая полупродукты и отходы; при этом надо учитывать, что эти элементы не только *ценные*, но и, в большинстве своем, *высокотоксичные*. Можно уверенно заключить, что из **попутных элементов** более или менее полно отслеживаются только Au и Ag, а в Cu–Ni подотрасли – лишь Co и ЭПГ, и то не всегда.

Важнейшим источником рассеянных/попутных элементов является (как правило, потенциальным) сырье горнорудных предприятий цветной металлургии (фиг. 6):

– **Cu** и **Zn** подотраслей (и практически отсутствующей Pb) – все рассеянные элементы, включая Ga;

– **Al** подотрасли – Ga;

– **Au** и **Au–Ag** месторождения – Sb, As, Te, Se, Bi, Tl.

Потенциально важным попутным источником лития являются рассолы газоконденсатных месторождений.

Большой проблемой в РФ является слабость отечественной высокотехнологичной индустрии, в постсоветские годы утратившей свои передовые позиции. В снабжении/сбыте она и ее смежники во многом “разориентированы”: одни производители почти полностью перешли на **импорт**, а другие – на **экспорт**. Необходимо преодоление такого “узковедомственного” подхода – как со стороны владельцев лицензий на добычу (ГОКов и т.п.), так и металлургических предприятий. Приоритет должен быть предоставлен государственному, четко продуманному подходу, включающему, прежде всего, комплексность использования природных ресурсов. При этом позиция руководства страны – однозначная: “Мы делаем ставку на рачительное, по-хозяйски умное освоение природных богатств России ... И добываемое сырье будем прежде всего использовать для глубокого передела внутри страны” (Путин, 2022). Правительством РФ предусмотрено ускоренное вовлечение отечественных источников сырья для производства перспективной высокотехнологичной промышленной продукции и новых материалов (Стратегия развития ..., 2018).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мировое развитие и научно-технический прогресс интенсифицируют использование минерального сырья – необходимой основы производства высокотехнологичной продукции. Россия, как и другие передовые страны-производители этой продукции (США, ЕС и др.), остро нуждается в различных сырьевых материалах, являющихся “критическими” для ее экономики и, как правило, поставляющихся из-за рубежа.

В экономике, включая *high-tech* отрасли, предприятия минерально-сырьевого комплекса и геологоразведку, надо выделить приоритеты, а также усилить планомерность – с обеспечением учета и контроля – в организации устойчивых цепочек добычи–обогащения–рафинирования редких и попутных металлов (дефицитного/критического сырья) для использования в высокотехнологических отраслях экономики.

Важнейшее значение приобретает оценка полноты и достоверности учета извлекаемых и оставляемых в недрах (в качестве целиков, подкарьерных блоков, мелких рудных тел и др., списываемых в потери) запасов основных и попутных компонентов при разработке месторождений. Государству необходимо стимулировать рост комплексности переработки и поощрять извлечение попутных компонентов. В области добычи минерального сырья и его использования необходимо добиться снижения зависимости отечественной экономики от импорта и укрепления надежности внутренних поставок видов сырья, критически важных в производстве высокотехнологичной продукции.

Расширение самообеспеченности должно стать приоритетом долгосрочной стратегии РФ в области минеральных ресурсов.

РАН и РосНедра необходимо проводить разработку методологии определения видов минерального сырья, критических для экономики страны, которая будет основана и на применении так называемого “матрикса критичности”, отражающего важность сырья и его доступность (возможность поставок) потребителю, и определяться другими факторами, прежде всего прибыльностью/окупаемостью.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаю глубокую признательность Н.П. Лаврову за помощь, поддержку и за пример служения науке и государству; Н.С. Бортникову – за постоянное внимание, ценные замечания по ходу работы над рукописью; специалистам ИМГРЭ (Е.Н. Левченко, Д.С. Ключарев), ВИМСа (А.М. Лаптева), Минприроды (А.В. Темнов), сделавших важные уточнения, улучшившие текст.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 13.1902.21.0018, соглашение 075-15-2020-802).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л., Викентьев И.В., Лаломов А.В., Аристов В.В., Мурашов К.Ю.* Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов России: состояние и перспективы развития // Геология руд. месторождений. 2016. Т. 58. № 2. С. 97–119.
- Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л., Викентьев И.В., Лаломов А.В., Мурашов К.Ю.* Фундаментальные проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности и энергетики России // Геология руд. месторождений. 2022. Т. 64. № 6. С. 617–633.
- Быховский Л.З., Тигунов Л.П., Темнов А.В.* Об определении понятия “редкие элементы” (“редкие металлы”): исторический и терминологический аспекты // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2015. № 3. С. 32–38.
- Викентьев И.В., Кайлачаков П.Э.* Уникальное месторождение рения в угленосных песках карбона Русской плиты. Сообщение 1. Геологическое строение // Литология и полез. ископаемые. 2020а. № 3. С. 209–226.
- Викентьев И.В., Бортников Н.С., Плотинская О.Ю., Тюкова Е.Э., Викентьева О.В., Сидорова Н.В., Абрамова В.Д., Ярцев Е.И., Коротеев В.А.* Критические металлы в рудных месторождениях Урала // Месторождения стратегических и высокотехнологичных металлов Российской Федерации: закономерности размещения, условия формирования, инновационные технологии прогноза и освоения. М.: ИГЕМ РАН, 2020б. С. 43–63.
- Галлий: Технологии получения и применение жидких сплавов / С.П. Яценко, Л.А. Пасечник, В.М. Скачков, Г.М. Рубинштейн. М.: РАН, 2020. 344 с.
- Гаськов И.В., Владимиров А.Г., Ханчук А.И., Павлова Г.А., Гвоздев В.И.* Особенности распределения индия в рудах некоторых полиметаллических и оловосульфидных месторождений Сибири и дальнего востока России // Геология руд. месторождений. 2017. Т. 59. № 1. С. 62–74.
- Государственный доклад “О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году”. М.: ФГБУ “ВИМС”, 2022. 623 с.
- Еремин Н.И.* Критическое минеральное сырье в экономике США и ЕС // Науч. конф. Ломоносовские чтения, МГУ, апрель 2012 г., секция Геологии. М.: МГУ, 2012. С. 1–4. http://geo.web.ru/pubd//2012/06/01/0001186421/pdf/eremin_2012.pdf
- Еремин Н.И.* Стратегическое, дефицитное и критическое минеральное сырье: интерактивное учебно-методическое пособие. М.: “КДУ”, 2020.
- Кайлачаков П.Э., Дойникова О.А., Белоусов П.Е., Викентьев И.В.* Уникальное месторождение рения в угленосных песках карбона Русской плиты. Сообщение 2. Минералогия руд // Литология и полез. ископаемые. 2020. № 4. С. 337–370.
- Куприянова И.И.* Геолого-геохимические факторы генезиса месторождений бериллия разных промышленно-типов // Руды и металлы. 2016. № 2. С. 18–30.
- Левченко Е.Н., Быховский Л.З., Спиридонов И.Г., Ключарев Д.С.* Особенности учета запасов редких металлов // Разведка и охрана недр. 2018. № 1. С. 45–51.
- Левченко Е.Н., Ключарев Д.С.* Технологическая оценка возможности переработки нетрадиционного редкометалльного сырья // Разведка и охрана недр. 2014. № 9. С. 41–45.
- Путин В.В.* Доклад на Восточном экономическом форуме, 09.2022. <http://kremlin.ru/events/president/news/69299>
- Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства РФ № 2914-р от 22.12.2018 г.
- Темнов А.В.* Государственное стимулирование добычи редких металлов / Минеральные ресурсы России // Экономика и управление. 2019. Т. 5 (168). С. 35–46.
- Ферсман А.Е.* Война и стратегическое сырье. Свердловск: Политиздат, 1941. 62с.
- Abraham D.S.* The Elements of Power: Gadgets, Guns, and the Struggle for a Sustainable Future in the Rare Metal Age. New Haven: Yale University Press, 2017. 336 p.
- Critical Metals Handbook / Edited by G. Gun. Oxford: Wiley & Sons, 2014.
- Jowitt S.M., McNulty B.A.* Battery and energy metals: future drivers of the minerals industry? // SEG Discovery. 2021. No 127. P. 11–18. <https://doi.org/10.5382/SEGnews.2021-127.fea-01>
- Marscheider-Weidemann F., Langkau S., Baur S.-J., Billaud M., Deubzer O., Eberling E., Erdmann L., Haendel M., Krail M., Loibl A., Maisel F., Marwede M., Neef C., Neuwirth M., Rosstek L., Rückschloss J., Shirinzadeh S., Stijepic D., Tercero E.L., Tippner M.* Raw Materials for Emerging Technologies – 2021. German Mineral Resources Agency (DERA) Rohstoffinformationen. Berlin, 2021. V. 50. 348 p.
- Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe’s raw materials challenge / Gregoir L., Acker, van K. Beretta S., Heron C. Tech. Report. KU Leuven & EUROMETAUX, 2022. 117 pp. Available at <https://eurometaux.eu/media/jmxf2qm0/metals-for-clean-energy.pdf>.
- Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy // National Research Council – 2008. Washington, D.C., National Academies Press, 2008. 264 p.
- Nassar N.T., Fortier S.M.* Methodology and Technical Input for the 2021 Review and Revision of the U.S. Critical Minerals List: U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1045. Reston: U.S. Geological Survey, 2021. 31 p.
- Rare Earth and Critical Elements in Ore Deposits / Ph.L. Verplanck and M.W. Hitzman, Eds. // Rev. Econ. Geol. 2016. V. 18. 365 p.
- Schwarz-Schampera U.* Indium // Critical Metals Handbook / Gus Gunn, editor. London: Wiley & Sons, 2014. P. 204–229.
- Vikentyev I., Vikent'eva O., Tyukova E., Nikolsky M., Ivanova J., Sidorova N., Tonkacheev D., Abramova V., Blokov V., Spirina A., Borisova D., Palyanova G.* Noble metal speciations in hydrothermal sulphides // Minerals. 2021. V. 11. Paper 488. P. 1–69. <https://doi.org/10.3390/min11050488>