

ISSN 0016-7770

Том 65, Номер 5

Сентябрь - Октябрь 2023



# ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Журнал по всем теоретическим и прикладным аспектам генезиса рудных месторождений.

[www.sciencejournals.ru](http://www.sciencejournals.ru)



# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Том 65, номер 5, 2023

---

---

*Специальный выпуск:* МЕТАЛЛЫ И МИНЕРАЛЫ ПРИ ПЕРЕХОДЕ К ЗЕЛеноЙ ЭНЕРГЕТИКЕ (по материалам научной конференции “ЛАВЁРОВСКИЕ ЧТЕНИЯ-2023”, Москва, 2 февраля 2023 г.). Редактор выпуска Н.С. Бортников

Проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности России <i>Н. С. Бортников, А. В. Волков, А. Л. Галямов, И. В. Викентьев, А. В. Лаломов, К. Ю. Мурашов</i>	371
Минерально-сырьевой потенциал стратегических остродефицитных видов минерального сырья для развития высокотехнологичной промышленности Российской Федерации <i>О. В. Петров, А. В. Молчанов, В. В. Шатов, Т. Н. Зубова</i>	387
Инновационные экологически безопасные процессы извлечения редких и редкоземельных элементов из комплексных руд сложного вещественного состава <i>В. А. Чантурия, А. И. Николаев, Т. Н. Александрова</i>	402
Взаимосвязь “РЗМ–энергопереход” в контексте проектов полного цикла <i>В. А. Крюков, В. А. Яценко, Я. В. Крюков</i>	416
Геостратегические риски при переходе к зеленым технологиям (на примере Африки) <i>И. О. Абрамова, А. Ю. Шарова</i>	428
Литиевый бум: источники лития и перспективы российской литиевой промышленности <i>А. Ю. Цивадзе, А. А. Бездомников, Г. В. Костикова</i>	444
Минеральные ресурсы атомной отрасли России и изоляция радиоактивных отходов <i>В. А. Петров, С. В. Юдинцев</i>	450
Критическое и стратегическое минеральное сырье в Российской Федерации <i>И. В. Викентьев</i>	463
Перспективы развития и проблемы освоения сырьевой базы дефицитных стратегических видов твердых полезных ископаемых Сибири <i>Н. П. Похиленко, В. П. Афанасьев, А. В. Толстов, Н. Н. Крук, Л. Н. Похиленко, О. А. Иванова</i>	476

---

---



УДК 553.493.5

## ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ

© 2023 г. Н. С. Бортников<sup>а</sup>\*, А. В. Волков<sup>а</sup>, А. Л. Галямов<sup>а</sup>,  
И. В. Викентьев<sup>а</sup>, А. В. Лаломов<sup>а</sup>, К. Ю. Мурашов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

\*E-mail: bns@igem.ru

Поступила в редакцию 01.07.2023 г.

После доработки 10.07.2023 г.

Принята к публикации 12.07.2023 г.

В статье рассмотрена проблема самообеспечения России импортозависимыми видами (включая критические) стратегического минерального сырья. Показано, что в последние годы Правительство России уделяет много внимания проблемам развития минерально-сырьевой базы (МСБ) стратегического сырья: в 2018 г. утверждена Стратегия развития МСБ Российской Федерации до 2035 года, а в 2022 г. утвержден обновленный впервые за 26 лет “Перечень основных видов стратегического минерального сырья (СМС)”. В статье отмечено, что по большинству позиций Перечня достигнуто самообеспечение СМС. По 17 позициям Перечня промышленность Российской Федерации сильно зависит от импортных поставок, а по отдельным позициям эта зависимость достигает 100%. Несмотря на это, многие отечественные месторождения СМС, критически зависимых от импорта, не разрабатываются, в связи с низкой рентабельностью. Выполненный в статье анализ показал, что Россия может полностью заместить импорт минерального сырья за счет развития собственной МСБ СМС. Наиболее быстрыми темпами самообеспечение может быть достигнуто за счет освоения россыпных месторождений, кор выветривания и рециклинга.

**Ключевые слова:** Россия, высокотехнологичная промышленность, минерально-сырьевая база, самообеспечение, импортозависимость, перечень стратегических видов минерального сырья, россыпные месторождения, техногенное сырье

DOI: 10.31857/S0016777023050039, EDN: WTJQSG

### ВВЕДЕНИЕ

В XX–XXI вв. спрос на полезные ископаемые растет по мере увеличения численности населения планеты. В последние годы полезные ископаемые используются все в более широком спектре областей, особенно связанных с внедрением новых технологий. Глобальная добыча основных видов минерального сырья достаточно быстро растет в соответствии с увеличением спроса. Также значительно увеличивается и потребление высокотехнологичных металлов (Бортников и др., 2022).

История свидетельствует о том, что растущий спрос на полезные ископаемые и более высокие цены, как правило, приводят к технологическим и научным инновациям, которые, в свою очередь, стимулируют появление новых или альтернативных источников минерального сырья. Недавние оценки мировых запасов полезных ископаемых свидетельствуют о том, что будущий спрос на полезные ископаемые возможно удовлетворить при условии продолжения инвестиций в науку и тех-

нологии. Не вызывает сомнения, что в будущем сохранится два основных источника металлов — это крупные и гигантские месторождения, а также рециклинг.

Сокращение потребления энергии и разрыв существующей связи с развитием металлургических производств и выбросами парниковых газов — одни из самых важных современных проблем в мире, прямо связаны с обеспечением устойчивого снабжения минеральным сырьем. По прогнозу организации по экономическому сотрудничеству и развитию (ОЭСД), в результате “перехода к зеленым технологиям” мировой спрос на металлы повысится быстрее, чем на любое другое сырье: с 8 до 20 гигатонн в год к 2060 г. (Coulomb et al., 2015). В последние годы особенно стремительно растет производство солнечной и ветровой электроэнергии в ведущих странах мира.

Статья подготовлена научным коллективом исследователей ИГЕМ РАН по Проекту Министерства науки и высшего образования РФ № 13.1902.21.0018: “Фундаментальные проблемы

развития минерально-сырьевой базы высокотехнологической промышленности и энергетики России". Статья написана на основе доклада, представленного 2 февраля 2023 года на научной конференции "Металлы и минералы при переходе к зеленой энергетике" (Лаверовские чтения-2023) в Москве, под эгидой 300-летия Российской академии наук.

В предыдущих публикациях мы показали, что отечественная экономика может быть полностью обеспечена отечественным стратегическим минеральным сырьем (Бортников и др., 2015, 2016, 2022). В данной статье рассмотрены проблемы самообеспечения России импортозависимыми видами (включая критические) стратегического минерального сырья.

При подготовке статьи, кроме результатов проекта, были использованы опубликованные данные и отчеты федеральных органов исполнительной власти, профильных научно-исследовательских институтов, отраслевых экспертов и аналитиков информационных агентств.

#### ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ВИДОВ СТРАТЕГИЧЕСКОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

В последние годы Правительство России уделяет много внимания проблемам развития МСБ стратегических и высокотехнологичных металлов. Указом Правительства Российской Федерации от 22 декабря 2018 г. утверждена Стратегия развития МСБ Российской Федерации до 2035 года (Стратегия..., 2018). В Стратегии цирконий, бериллий, литий, рений, редкие земли иттриевой группы включены в *группу дефицитных полезных ископаемых*, внутреннее потребление которых в значительной степени обеспечивается вынужденным импортом и (или) складированными запасами. Месторождения этих металлов характеризуются преимущественно низким качеством.

В Стратегии подчеркивается, что российская МСБ практически каждого стратегического вида минерального сырья весьма значительна, что позволяет стране занимать лидирующие позиции в мире: по танталу – первое, по ниобию, РЗМ, германию – второе, по литию, цирконию, бериллию – третье.

Сравнительно недавно, распоряжением от 30 августа 2022 года Правительство Российской Федерации утвердило обновленный впервые за 26 лет "Перечень основных видов стратегического минерального сырья". Предыдущий Перечень действовал с 16 августа 1996 года и содержал 29 позиций, новый – расширен до 61 позиции (фиг. 1).

К основным видам стратегического минерального сырья в России отнесены: нефть, природный газ, гелий, уран, марганец, хром, титан, бок-

ситы, медь, свинец, сурьма, олово, цинк, никель, молибден, вольфрам, кобальт, золото, серебро, алмазы, графит, платиноиды: рутений, родий, палладий, осмий, иридий, платина; литий, рубидий, цезий, бериллий, скандий, иттрий, лантан, церий, празеодим, неодим, самарий, европий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций, индий, галлий, германий, цирконий, гафний, ванадий, ниобий, тантал, рений, апатитовые руды, калийные соли, плавиковый шпат, особо чистое кварцевое сырье и подземные воды.

Распоряжение предусматривает актуализацию перечня основных видов стратегического минерального сырья не реже, чем один раз в три года. В соответствии с утвержденным Перечнем планируется приоритетное финансирование работ по воспроизводству МСБ дефицитных видов стратегического минерального сырья за счет средств федерального бюджета.

Сравнительный анализ Перечня и статистических данных (Бортников и др., 2015, 2015, 2022; Госдоклад..., 2022) показывает, что самообеспечение РФ, кроме углеводородов, достигнуто по следующим видам стратегического минерального сырья: меди, никелю, свинцу, цинку, молибдену, вольфраму, олову, цирконию, кобальту, платиноидам, золоту, серебру, алмазам, фосфатам, калийным солям и особо чистому кварцевому сырью. Под самообеспечением понимается способность страны удовлетворить текущий и прогнозируемый в среднесрочной перспективе внутренний спрос за счет собственного производства и на собственной ресурсной базе. Перспективы наращивания экспорта на внешние рынки перечисленных видов минерального сырья в рамках подобного анализа экспертами обычно не рассматриваются, хотя такая задача вполне может быть поставлена в связи с государственной необходимостью. Ниже приведен пример последних лет по достижению РФ самообеспечения (импортозамещения) циркониевым сырьем.

Минералы-носители циркониевого сырья – циркон ( $ZrSiO_4$ ) и в незначительной степени (5%) – бабделит ( $ZrO_2$ ), а в перспективе, возможно, эвдиалит. Цирконий применяется в атомной энергетике, производстве термостойкой керамики и эмалей, медицине и др.

Россия находится на третьем месте в мире по величине запасов циркония с долей в 6%. Балансовые запасы по сумме категорий – 12.4 млн т. Однако доля РФ в мировом производстве циркониевых концентратов не превышает 1%. Отметим, что мировые запасы циркония на 90% связаны с россыпями.

Основная часть российских балансовых запасов циркония (68.9%) сосредоточена в пяти коренных месторождениях трех геолого-промыш-

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА																				
I A																	VIII A			
I																	18			
1.00794																	4.00260			
1H																	2He			
ВОДОРОД																	ГЕЛИЙ			
II A														III A		IV A	V A	VI A	VII A	
2														13		14	15	16	17	
6.941														10.811		12.0107	14.0067	15.9994	18.9984	20.1797
3Li														5B		6C	7N	8O	9F	10Ne
ЛИТИЙ														БОР		УГЛЕРОД	АЗОТ	КИСЛОРОД	ФТОР	НЕОН
9.01218														26.9815		28.0855	30.9738	32.065	35.453	39.948
11Na														13Al		14Si	15P	16S	17Cl	18Ar
НАТРИЙ														АЛЮМИНИЙ		КРЕМНИЙ	ФОСФОР	СЕРА	ХЛОР	АРГОН
24.3050														26.9815		28.0855	30.9738	32.065	35.453	39.948
III B		IV B	V B	VI B	VII B	VIII B					I B	II B								
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12											
44.9559	47.867	50.9415	51.9961	54.9380	55.845	58.9332	58.6934	63.546	65.38	69.723	72.63	74.9216	78.96	79.904	83.798					
21Sc	22Ti	23V	24Cr	25Mn	26Fe	27Co	28Ni	29Cu	30Zn	31Ga	32Ge	33As	34Se	35Br	36Kr					
СКАНДИЙ	ТИТАН	ВАНАДИЙ	ХРОМ	МАРГАНЕЦ	ЖЕЛЕЗО	КОБАЛЬТ	НИКЕЛЬ	МЕДЬ	ЦИНК	ГАЛЛИЙ	ГЕРМАНИЙ	МЫШЬЯК	СЕЛЕН	БРОМ	КРИПТОН					
88.9058	91.224	92.9064	95.96	[98]	101.07	102.905	106.42	107.868	112.411	114.818	118.710	121.760	127.60	126.904	131.293					
39Y	40Zr	41Nb	42Mo	43Tc	44Ru	45Rh	46Pd	47Ag	48Cd	49In	50Sn	51Sb	52Te	53I	54Xe					
РУБИДИЙ	СТРОНЦИЙ	ЦИРКОНИЙ	НИОБИЙ	МОЛИБДЕН	ТЕХНЕЦИЙ	РУТИНИЙ	РОДИЙ	ПАЛЛАДИЙ	СЕРЕБРО	КАДМИЙ	ИНДИЙ	ОЛОВО	СУРЬМА	ТЕЛЛУР	ЙОД	КСЕНОН				
85.4678	87.62	88.9058	91.224	92.9064	95.96	[98]	101.07	102.905	106.42	107.868	112.411	114.818	118.710	121.760	127.60	126.904	131.293			
57La	58Ce	59Pr	60Nd	61Pm	62Sm	63Eu	64Gd	65Tb	66Dy	67Ho	68Er	69Tm	70Yb							
ЛАНТАНОИДЫ	ЛАНТАН	ЦЕРИЙ	ПРАЗЕОДИЙ	НЕОДИМ	ПРОМЕТИЙ	САМАРИЙ	ЕВРОПИЙ	ГАДОЛИНИЙ	ТЕРБИЙ	ДИСПРОЗИЙ	ГОЛЬМИЙ	ЭРБИЙ	ТУЛЬИЙ	ИТТЕРБИЙ						
132.905	137.327	174.967	178.49	180.948	183.84	186.207	190.23	192.217	195.084	196.967	200.59	204.383	207.2	208.980	[209]	[210]	[222]			
55Cs	56Ba	71Lu	72Hf	73Ta	74W	75Re	76Os	77Ir	78Pt	79Au	80Hg	81Tl	82Pb	83Bi	84Po	85At	86Rn			
ЦЕЗИЙ	БАРИЙ	ЛЮТЕЦИЙ	ГАФНИЙ	ТАНТАЛ	ВОЛЬФРАМ	РЕНИЙ	ОСМИЙ	ИРИДИЙ	ПЛАТИНА	ЗОЛОТО	РУТЬ	ТАЛЛИЙ	СВИНЕЦ	ВИСМУТ	ПОЛОНИЙ	АСТАТ	РАДОН			
[223]	[226]	[262]	[267]	[270]	[271]	[274]	[277]	[281]	[281]	[281]	[285]	[286]	[289]	[289]	[293]	[294]	[294]			
87Fr	88Ra	103Lr	104Rf	105Db	106Sg	107Bh	108Hs	109Mt	110Ds	111Rg	112Cn	113Uut	114Fl	115Uup	116Lv	117Uus	118Uuo			
ФРАНЦИЙ	РАДИЙ	ЛОУРЕНСИЙ	РЕЗЕРФОРДИЙ	ДУБНИЙ	СИБОРГИЙ	БОРИЙ	ХАССИЙ	МЕЙТНЕРИЙ	ДАРМШТАДИЙ	РЕНТЕНИЙ	КОПЕРНИЦИЙ		ФЛЕРОВИЙ		ЛИВЕРМОРИЙ					
138.905	140.116	140.908	144.242	[145]	150.36	151.964	157.25	158.925	162.500	164.930	167.259	168.934	140.908							
* ЛАНТАНОИДЫ	57La	58Ce	59Pr	60Nd	61Pm	62Sm	63Eu	64Gd	65Tb	66Dy	67Ho	68Er	69Tm	70Yb						
	ЛАНТАН	ЦЕРИЙ	ПРАЗЕОДИЙ	НЕОДИМ	ПРОМЕТИЙ	САМАРИЙ	ЕВРОПИЙ	ГАДОЛИНИЙ	ТЕРБИЙ	ДИСПРОЗИЙ	ГОЛЬМИЙ	ЭРБИЙ	ТУЛЬИЙ	ИТТЕРБИЙ						
[227]	232.038	231.036	238.029	[237]	[244]	[243]	[247]	[247]	[251]	[252]	[257]	[258]	[259]							
** АКТИНОИДЫ	89Ac	90Th	91Pa	92U	93Np	94Pu	95Am	96Cm	97Bk	98Cf	99Es	100Fm	101Md	102No						
	АКТИНИЙ	ТОРИЙ	ПРОАКТИНИЙ	УРАН	НЕПТУНИЙ	ПУТОНИЙ	АМЕРИЦИЙ	КЮРИЙ	БЕРКЛИЙ	КАЛИФОРНИЙ	ЭЙНШТЕЙНИЙ	ФЕРМИЙ	МЕНДЕЛЕВИЙ	НОБЕЛИЙ						

Фиг. 1. В периодической системе химических элементов Д.И. Менделеева выделен красным 51 химический элемент из обновленного Перечня стратегических видов минерального сырья.

ленных типов: трех редкометалльного щелочно-гранитного типа (Улуг-Танзекском в Республике Тыва, Зашихинском в Иркутской области и Катугинском месторождении в Забайкальском крае), одного карбонатитового (Ковдорское в Мурманской области) и одного, представляющего собой литифицированную россыпь (Пижемское в Республике Коми). В погребенных прибрежно-морских россыпях содержится 31.1% запасов.

Руды Улуг-Танзекского, Катугинского и Пижемского месторождений — труднообогатимые (Госдоклад ..., 2022). Многие из балансовых месторождений находятся в удаленных районах со слабо развитой инфраструктурой.

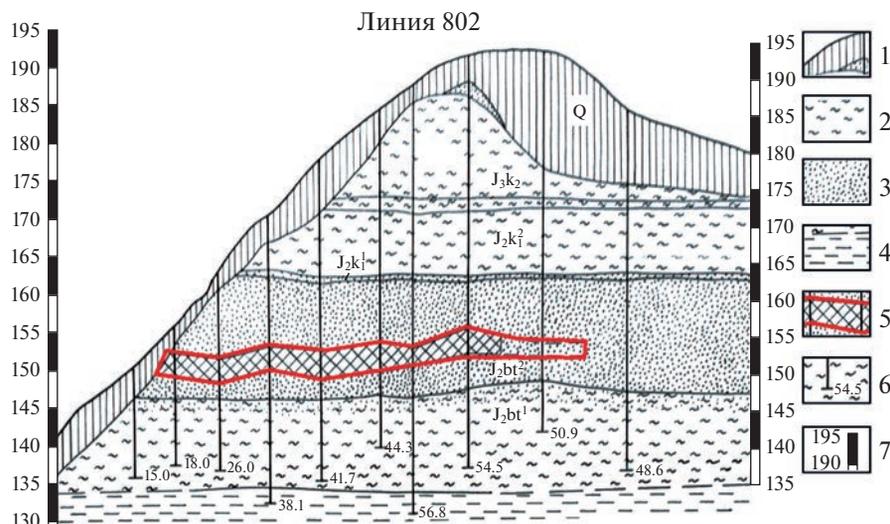
Видимое потребление циркониевых концентратов в России составляет 9.9–11.6 тыс. т в год. Более чем на 90% оно обеспечивается импортными цирконовыми концентратами, в незначительной степени — отечественным бадделитовым сырьем.

В России перспективы самообеспечения циркониевым сырьем были связаны с двумя месторождениями: россыпным Туганским и коренным Зашихинским. В апреле 2022 Туганский ГОК вышел на проектную мощность первой очереди (2.4 тыс. т  $ZrO_2$ ). С выходом на полную мощность в 2029 г ГОК сможет обеспечить поставку 14.7 тыс. т  $ZrO_2$ , что закроет текущие потребности страны.

Еще один перспективный объект — находящееся в 180 км к югу от Нижнего Новгорода Лукояновское месторождение титаноциркониевых песков (фиг. 2), богатейшее по содержанию циркона в России (13 кг/м<sup>3</sup>) и второе в мире после австралийской россыпи Атлас-буна Нарринг с содержанием 17.4 кг/м<sup>3</sup>. Подтвержденные запасы рудных песков ( $C_1 + C_2$ ) 30 млн т и прогнозные ресурсы ( $P_1 + P_2$ ) более 100 млн т. На балансе стоит детально разведанный Итмановский участок месторождения, запасы которого, разведанные по категории  $C_1 + C_2$  — 388.9 тыс. т. Запасы содержащегося в цирконе диоксида гафния оценены в 6.3 тыс. т при содержании 0.2 кг/м<sup>3</sup>. Кроме того, участок содержит запасы оксида титана около 1 млн т (в ильмените, рутиле и лейкоксене). Около 40% запасов участка могут быть отработаны карьером, остальные — по технологии скважинной гидробоуцы. Россыпь содержит ильменит-хромит-гематитовый продукт, который трудно поддается разделению и осложняет технологические свойства продуктивных «песков».

Запасы только двух россыпных объектов (Туганского и Итмановского) могут обеспечить потребности России в циркониевом сырье на текущем уровне приблизительно на 130 лет.

Стоимость циркониевых концентратов с поставкой из Австралии с 2016 по 2022 год выросла с



**Фиг. 2.** Геологический разрез Итмановского участка Лукояновского титано-циркониевого месторождения (Осипов, 1985ф)<sup>1</sup>

1 – почвенно-растительный слой; 2 – глины; 3 – пески; 4 – алевриты; 5 – промышленный пласт; 6 – скважины (глубина, м); 7 – высотные отметки. Среднеюрские отложения: J<sub>2</sub>bt – батский ярус; J<sub>2</sub>k – келловейский ярус.

810 до 1855 долл/т (Госдоклад ..., 2022), что указывает на перспективность инвестиций в отечественное циркониевое сырье.

### ПРОБЛЕМА ЗАВИСИМОСТИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ ОТ ИМПОРТА МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

В современных геополитических условиях зависимость высокотехнологичной промышленности Российской Федерации от импортных поставок стратегических видов минерального сырья – серьезная угроза национальной безопасности страны. Поэтому важнейший приоритет государственной политики России – импортозамещение и создание производств полного цикла на основе отечественной МСБ стратегических видов минерального сырья.

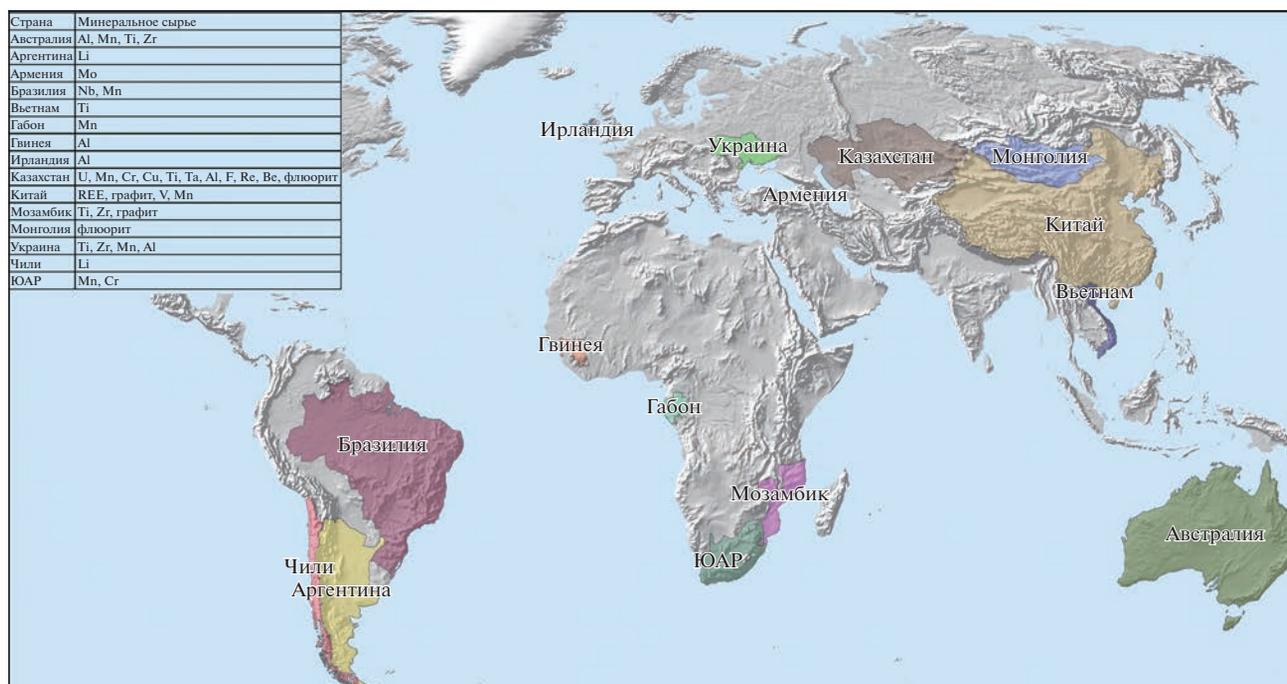
По данным Счетной палаты РФ (Кульбас, 2021), за 2018–2020 гг. Россия импортировала более трети стратегических видов минерального сырья и свыше 60% дефицитных видов полезных ископаемых (с учетом импорта “переработанных”). По ряду наименований, в частности по марганцу, хрому, титану и литию, российские потребности полностью покрываются исключительно импортом, а по цирконию этот показатель составляет 87.2%.

<sup>1</sup> Осипов А.П., Отчет о поисково-оценочных работах в пределах центральной части Лукояновского титано-циркониевого м-ния (Итмановская залежь) в Лукояновском р-не Горьковской обл., выполненных Лукояновской ГПП в 1982–85 гг. Горький: Лукояновское ГПП, 1985.

Счетная палата также отметила высокую долю импорта по некоторым видам минерального сырья, которые не являются стратегическими, но имеют важное значение для развития промышленности: йод – 100%, плавиковый шпат – 95%, бентониты для литейного производства – 89.6%, каолин – 68.3%. Они имеют широкую область применения и используются в металлургической, химической, атомной, медицинской и прочих отраслях. Также российские предприятия частично обеспечиваются по таким стратегическим видам минеральных ресурсов, как бокситы (доля импорта за 3 года – 68.6%), медь (49.6%), молибден (40.2%). Россия также импортирует (100%): соединения бериллия, оксиды разделенных РЗЭ или индивидуальные металлы и их смеси (Кульбас, 2021).

За прошедшие 3 года, ситуация с обеспеченностью страны собственным сырьем практически не изменилась, а импортозависимость по ряду видов стратегического минерального сырья, например, по марганцу, литию и титану, стала еще более острой. Основными поставщиками стратегических и дефицитных видов минерального сырья в Россию выступают Казахстан, Чили, Китай, Монголия, ЮАР, Гвинея, Украина и другие страны (фиг. 3).

Аналитики МЭР и Минпромторга полагают, что большинство из этих импортозависимых видов стратегического минерального сырья могут испытывать очень большой рост спроса к 2030 г. и в дальнейшем. Этот вывод полностью согласуется с общемировой тенденцией (Стратегия..., 2022).



Фиг. 3. Главные поставщики стратегического минерального сырья в Россию, по данным (Госдоклад..., 2022; Кульбас, 2021).

Самостоятельная товарная продукция производится в России только из двух собственных месторождений: Ловозерского в Мурманской области – титан, ниобий, тантал, РЗМ – и Павловского в Приморском крае – германий. Кроме того, в качестве попутных компонентов запасы ряда стратегических видов минерального сырья учтены и извлекаются (в небольших объемах) из 24 комплексных месторождений. По ряду стратегических видов минерального сырья нет достоверных статистических данных. В стране полностью отсутствует добыча лития и бериллия (Бортников и др., 2016).

### РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-СТАТИСТИЧЕСКОГО ГИС-АНАЛИЗА

На территории России насчитывается более 1400 месторождений с промышленными содержаниями дефицитных в стране полезных ископаемых (фиг. 4). В их число входят более 30 крупных месторождений (Стрельцовское, Элькон, Катугинское, Ловозеро, Томторское, Ковдорское и др.). Основными компонентами их руд являются бокситы, U, Mn, Nb, Ta, РЗЭ, Ti и флюорит. Большинство средних и малых месторождений цветных, черных, редких и радиоактивных металлов ориентированы на добычу W, Mo, U, Be, Nb, Ta, РЗЭ, Ti, Cr и U.

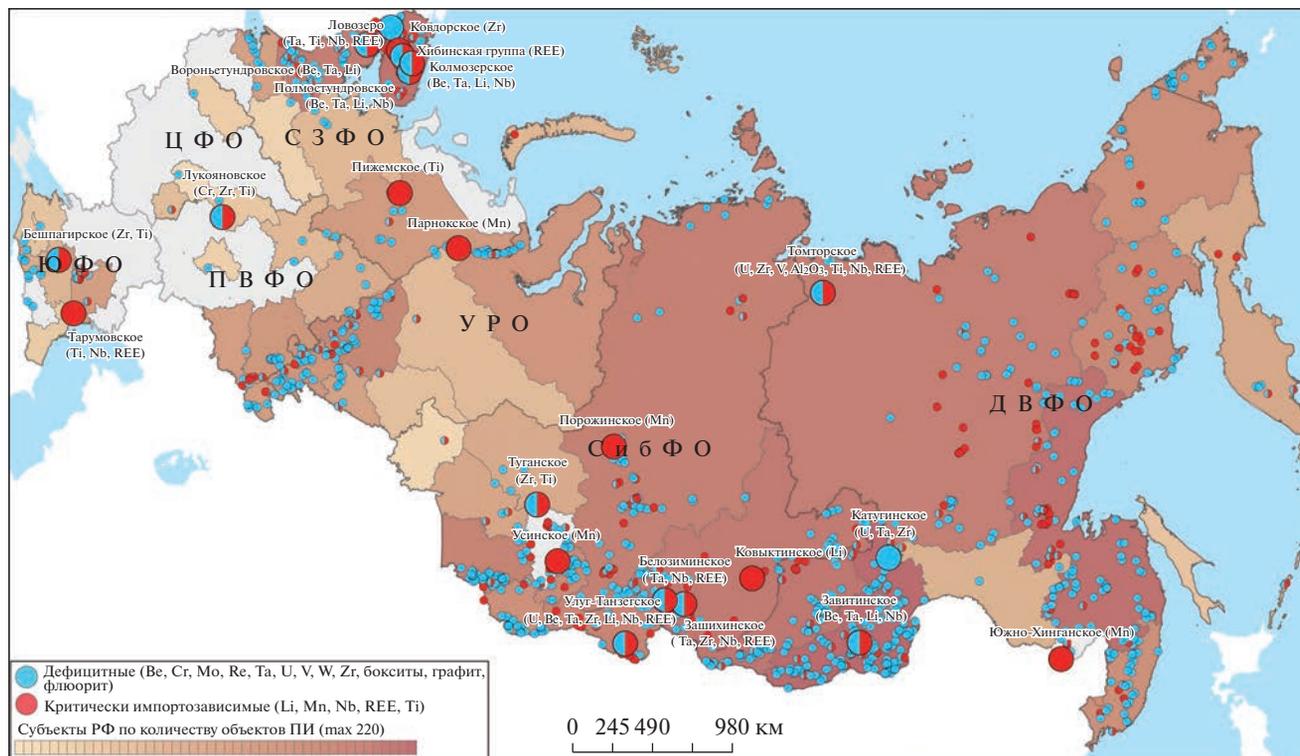
Дефицитные полезные ископаемые Al, W и Mo (табл. 1), относящиеся к бокситовому, кассите-

рит-силикатному и вольфрам-молибденовому грейзеновому типам, а также к медно-молибден-порфировому и колчеданно-полиметаллическому в терригенных породах (Красная Шапочка, Богословское, Сосвинское, Быстринское, Песчанка, Холоднинское и др.), содержатся в рудах более 400 месторождений цветных металлов.

Руды Cr, V, Mn, Ti (табл. 1) включают почти 300 месторождений черных металлов (Большой Сейим, Чинейское, Порожинское и др.), которые связаны с различными минеральными типами: апатит-ильменитовым и ильменит-магнетитовым в габброидах, магнетитовым вулканогенным, ванадий-титановым в ультрамафит-мафитах, марганцевым в карбонатных породах и корях выветривания.

Редкие металлы Be, Nb, Ta, Zr, Li и РЗЭ (табл. 1) содержатся в рудных телах более 200 месторождений (Катугинское, Зашихинское, Ловозеро, Томторское, Селигдар, Ковдорское и др.), локализованных в редкоземельно-тантал-ниобиевых щелочных гранитоидах, апатит-нефелиновых в расслоенных щелочных интрузиях, ультраосновных-щелочных интрузиях и карбонатитах, грейзенах с флюоритом и турмалином, в карбонатитовых и апатит-редкометалльных переотложенных корях выветривания.

Урановые руды таких минеральных типов, как фтор-молибден-урановый, гумбеитовый, “несогласия” и “погребенных палеодолин”, размеща-



**Фиг. 4.** Карта распределения основных месторождений и перспективных рудопроявлений дефицитных и критически импортозависимых СМС. Карта составлена в результате пространственно-статистического ГИС-анализа.

ются в более чем 200 месторождениях (Стрельцовское, Далматовское, Хиагдинское, Элькон и др.).

По количеству месторождений дефицитного минерального сырья в России лидируют регионы Сибири. На территории старейших горнорудных районов Забайкалья сосредоточены более 200 месторождений (в т.ч. крупные Стрельцовское, Катугинское, Чинейское, Быстринское), руды которых содержат, в основном, недооцененные ресурсы импортозависимых Li, Mn, REE, Ti, Nb. В

Хабаровском крае размещаются более 100 средних и малых месторождений также с недооцененными ресурсами Be, Ta, Zr, Cr, Mo, U, V, W, Mn, Nb, REE, Ti.

В целом в десяти сибирских субъектах РФ почти 800 месторождений содержат длинный ряд дефицитных компонентов – Be, Ta, Mo, Zr, U, V, W, CaF, Cr, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Re, а также импортозависимых – Li, Mn, REE, Ti, Nb.

**Таблица 1.** Соотношение количества месторождений дефицитных полезных ископаемых по группам металлов

Группа	Кол-во объектов в группе	Дефицитные										Импортозависимые					
		боксит	Be	флюорит	Cr	Mo	Re	Ta	U	V	W	Zr	Li	Mn	Nb	REE	Ti
Цветные	475	38	5			172		1	5	11	233		1		1	1	7
Черные	292		1	8	90	3		1	7	38	4	14		28	1		97
Редкие	375		70	7		6	2	64	4		7	28	35		66	83	3
Радиоактивные	240		1		1	9		1	219	5				1	1	2	
Меднорудные	49		1			42	1	1			3		1				
Благородные	39		1		1	7				1	6					22	1
Свинцово-цинковые	10								3		2		1	1		1	
Неметаллы	10			10													
Горючие	8												1				7



Фиг. 5. Импортозависимые стратегические виды минерального сырья, по данным Минприроды РФ.

В Южной Сибири (Алтай, Кузнецкий Алатау, Тыва и Хакасия) почти 200 месторождений имеют промышленные концентрации дефицитных  $Al_2O_3$ , Be, Cr, Mo, V, W, Ta, Re, Zr, U, CaF и импортозависимых Ti, Li, Nb, REE, Mn.

В Уральском округе (9 субъектов РФ) находится более 200 месторождений с промышленными содержаниями  $Al_2O_3$ , Be, Ta, Cr, Mo, Re, V, W, Zr, CaF, U, Mn, REE, Nb, Ti.

Северо-западный округ известен своими крупными месторождениями редких металлов (Ловозеро, Ковдорское, Ждановское). В этом регионе насчитывается около 200 малых месторождений с Be, CaF, Ta, Cr, V, Mo, Zr, U,  $Al_2O_3$ , U, W, Nb, REE, Ti, Li, Mn, ресурсы которых недооценены.

Наиболее малочисленны в стране месторождения рения и лития. Запасы и ресурсы рения оценены в рудах единичных месторождений медно-молибден-порфирирового типа (Аксуг, Республике Тыва и др.). Около 30 небольших по масштабу месторождений Li связаны с редкометальными пегматитами и щелочными метасоматитами (Колмозерское, Полмозерское и др. в Мурманской области, Баянгол в Республике Тыва, Завитинское в Забайкалье и др.); многие из них имеют незначительные ресурсы, либо недооценены. Оценка запасов и ресурсов подземных рассолов с содержаниями лития на газовом Ковыктинском месторождении в Иркутской области и других аналогичных объектах (в Дагестане, Якутии) могут существенно сократить дефицит лития.

#### КРИТИЧЕСКИ ЗАВИСИМЫЕ ОТ ИМПОРТА ВИДЫ СТРАТЕГИЧЕСКОГО МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

В последнее время сотрудники Минприроды (МПР) РФ из утвержденного перечня (см. выше)

выделяют 17 видов стратегического минерального сырья, зависимых от импорта (фиг. 5). Причем 12 видов стратегического минерального сырья из этого списка (синяя группа, см. фиг. 5) частично добываются на территории России или имеют надежные каналы импортных поставок из дружественных стран. В то же время большое количество продуктов металлургического передела из импортируемого СМС не находят потребителя внутри страны (Бортников и др., 2015, 2016, 2022).

В красную группу критически зависимых от импорта видов минерального сырья (фиг. 5) были объединены всего пять видов (Mn, Ti, Nb, Li, REE). По данным МПР РФ, эта группа имеет наиболее высокие риски остановки поставок. Именно на финансирование геологоразведки месторождений этой группы минерального сырья, по-видимому, планируется направлять в приоритетном порядке выделенные бюджетные средства.

В целях оценки текущего состояния МСБ и выявления проблем, требующих решения, в рамках настоящей статьи проведен анализ критически зависимых видов стратегического минерального сырья.

**Марганец** относится к черным металлам, как и железо. Приблизительно 90% всего Mn используется в черной металлургии – в виде ферромарганца (сплав Mn с железом), его добавляют в сталь для повышения износостойчивости, ковкости и прочности. Кроме того, Mn применяется для легирования, десульфурации и “раскисления” сталей.

В цветной металлургии Mn входит в состав ряда сплавов: в бронзу, латунь, алюминийевые и магниевые сплавы для улучшения их прочности и устойчивости к коррозии. Используется Mn и при изготовлении специального электротехнического сплава с медью и никелем, отличающегося высоким сопротивлением.

Соединения Mn также используются в органическом синтезе в качестве окислителей и катализаторов, в полиграфии, производстве красок, в стекольном и керамическом производстве, для создания экономных холодильных установок нового типа. Перманганат калия – известный антисептик в медицине, антидот при отравлении цианидами и алкалоидами; отбеливающее средство в текстильной промышленности; окислитель в органическом синтезе.

Суммарная потребность российской экономики в марганце составляет примерно 2.2 млн т в год, из которых 1.6 млн т (72% потребления) импортируется. Зависимость от импорта составляет 100% (1.3 млн т) по марганцевым рудам, 46% (192 тыс. т) по силикомарганцу, 100% (68 тыс. т) по марганцу металлическому, 10% (21 тыс. т) по ферромарганцу (Стратегия..., 2018). Импорт марганцевых руд в 2021 году составил 1394 тыс. т (Стратегия..., 2022).

Балансовые запасы марганцевых руд в Российской Федерации категорий A+B+C<sub>1</sub> составляют 137.5 млн т, категории C<sub>2</sub> – 146 млн т, в том числе в распределенном фонде недр находится 44% запасов. К основным месторождениям марганцевых руд относятся такие месторождения, как Усинское, Порожинское, Парнокское и Южно-Хинганское, содержащие 59% запасов марганцевых руд в Российской Федерации. К крупным месторождениям марганцевых руд относятся Усинское в Кемеровской области (55.5% от балансовых запасов страны) и Порожинское месторождение в Красноярском крае (12.8%). Основная доля запасов и прогнозных ресурсов высоких категорий расположена в Уральском (30.4%) и Сибирском (63%) федеральных округах.

Степень промышленного освоения российской минерально-сырьевой базы марганца низкая, поскольку часть месторождений представлена бедными (9–23% Mn) труднообогатимыми (фосфористыми, карбонатными) рудами, переработка которых по традиционным технологиям нерентабельна, что требует выработки мер государственной поддержки, направленных на освоение минерально-сырьевой базы марганца. Исключение составляет единственное Парнокское месторождение – 31%. В зарубежных объектах его среднее значение колеблется в диапазоне 37–38%.

Таким образом, работа многих металлопотребляющих предприятий России находится в зависимости от импорта марганцевого сырья. Так, 60% марганцевых концентратов и ферросплавов везут из Китая, Габона, Австралии, Бразилии и ЮАР (фиг. 3), что существенно увеличивает стоимость конечной продукции. Часть закупают в странах ближнего зарубежья – в Казахстане, Грузии и ранее на Украине (фиг. 3). В частности, бо-

лее 30% импортируемых Россией марганцевых сплавов поставляла украинская группа “Приват”.

Таким образом, по мнению Минпромторга, необходимо диверсифицировать импорт и, прежде всего, переориентироваться на дружественные страны, а также разрабатывать эффективные технологии переработки некондиционных руд (Стратегия..., 2022).

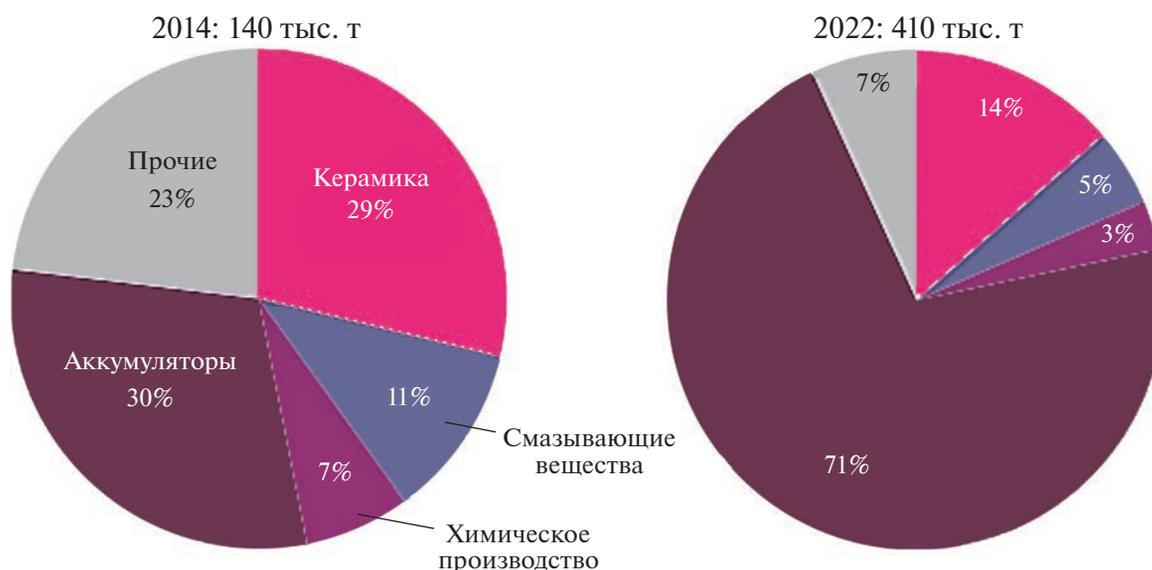
*Литий* сегодня – один из наиболее востребованных в мире военными и гражданскими отраслями промышленности редких металлов. В связи с открытием, разведкой и подсчетами запасов Li в последние 60 лет в десятках крупнейших месторождений мира с запасами от 1 до 11 млн т Li<sub>2</sub>O в структуре его запасов и добычи произошли серьезные изменения: в настоящее время до 70% Li производится за счет эксплуатации рассолов и рапы бессточных соляных озер с содержаниями 0.06–0.5% Li<sub>2</sub>O, а из редкометальных гранитных пегматитов со средними содержаниями 1.1–3.0% Li<sub>2</sub>O получают всего 30% этого металла (Mineral..., 2022).

С учетом прогнозируемого роста количества электромобилей до 50–70 млн к 2025 г., сегмент автомобильных аккумуляторов в общей структуре спроса на металлургическую продукцию с 2014 по 2022 г. увеличился с 30% до 71% (фиг. 6). Мировых запасов лития хватит более чем на 100 лет добычи, млн т (Mineral..., 2022).

По запасам лития Россия занимает третье место в мире (около 1 млн т) (Мелентьев, 2016). Государственным балансом запасы лития учтены в 17 месторождениях. В распределенном фонде числятся четыре месторождения, однако литиевые месторождения не разрабатываются и литиевое сырье на территории Российской Федерации в настоящее время не производится. В структуре балансовых запасов ведущую роль играют пегматитовые месторождения (75%). По запасам и содержанию они несколько меньше и беднее зарубежных. Месторождения редкоземельных гранитов, где литий является побочным компонентом, до сих пор не представляют промышленного интереса. Залежи слюдяных флюоритовых метасоматитов присутствуют в виде небольших сырьевых объектов. В настоящее время добыча лития на территории России не ведется (Стратегия..., 2018).

В России имеется значительный дефицит лития, используемого в первую очередь для обеспечения атомной энергетики, систем накопления энергии, а также в качестве сырья при производстве шлакообразующих смесей для ковшей, смазок для горнорудных производств и создания производства литий-ионных аккумуляторных батарей.

Нераспределенный фонд составляют 13 месторождений. В их число входят и 7 собственно ли-



Фиг. 6. Производство аккумуляторов – главный фактор, обеспечивающий рост спроса на карбонат лития.

тивных месторождений в сподуменовых пегматитах – Вороньтундровское, Колмозерское, Полмостундровское в Мурманской области и др. Невысокие содержания лития в большинстве российских месторождений, неразвитая инфраструктура, несовершенство технологических схем обогащения не позволяют их рентабельно разрабатывать.

В 2021 году Россия импортировала около 8 тыс. тонн карбоната лития, главным образом из Чили и Аргентины (фиг. 3). В 2020 г., на фоне пандемии коронавируса, – 7.5 тыс. тонн. В январе 2022 г. карбонат лития стоил более 48 тысяч долларов за тонну. По сравнению с январем 2021 г. он подорожал на 430 процентов. Следует отметить, что в карбонате лития содержание самого лития составляет 19%. Соответственно, цифры по карбонату лития примерно в пять раз выше, чем оценки по чистому металлу.

Российский рынок представлен только мощностями по переработке лития. Предприятия работают полностью на импортном сырье, уровень загрузки мощностей оценивается в 30%. Отечественная промышленность лития – это заводы по переработке карбоната лития (ПАО “Химико-металлургический завод” в Красноярске, ПАО “Новосибирский завод химических концентратов” (“Росатом”) и ООО “ТД Халмек” (Тульская обл.)). Из общего объема выпуска лития из импортируемого сырья (примерно в 2000 т) 400–700 т потребляется непосредственно в России, остальные 1300–1600 т экспортируются.

В целом спрос на литий в РФ, по экспертным данным, в настоящее время минимален и связан с атомной отраслью и ВПК. Кроме того, из лития

в России производят стекло и смазочные материалы. Учитывая, что производство лития – процесс энергоемкий, а электроэнергия в России значительно дешевле, чем в Европе и США, себестоимость отечественного металла достаточно привлекательна. Карбонат лития собственного производства планируется получить через 2–3 года (Стратегия..., 2022).

По данным Минпромторга, “Химико-металлургический завод” в г. Новосибирске оформляет лицензию на добычу лития из техногенных отвалов Завитинского месторождения в Забайкальском крае, кроме того, будут лицензированы месторождения в Мурманской области совместным предприятием Росатома и Норникеля. Планируется, что литий будет добываться на Ковыктинском месторождении из минерализованных подземных вод (проект Газпрома и Иркутской нефтяной компании).

В случае успешной реализации Завитинского проекта ожидается, что из 20 млн т отходов можно будет извлечь до 40 тыс. т карбоната лития. Потенциальные запасы лития в Ангаро-Ленском бассейне позволяют организовать добычу от 5000 до 10000 т в год, что сопоставимо с крупными международными компаниями. Столько планируется добывать и в Мурманской области.

Подготовленный еще в СССР проект добычи Li из рассолов Тарумовского месторождения (Дагестан) предполагал: суммарную годовую добычу – 5.5 млн м<sup>3</sup> при суточном дебите 15000 м<sup>3</sup>, в том числе карбоната лития 4500 т; способ эксплуатации фонтанный. В энергетическом плане планировалось строительство Тарумовской ГеоТЭС мощностью 400 МВт (Отчет..., 2014).

**Таблица 2.** Параметры основных циркон-рутил-ильменитовых россыпей России

Месторождение	Генезис	TiO <sub>2</sub>		ZrO <sub>2</sub>	
		запасы A + B + C <sub>1</sub> + C <sub>2</sub> , тыс. т	среднее содержание, кг/м <sup>3</sup>	запасы A + B + C <sub>1</sub> + C <sub>2</sub> , тыс. т	среднее содержание, кг/м <sup>3</sup>
Восточно-Европейская мегапровинция					
Бешпагирское*	ППМ**	2630	20.9	620.6	5.1
Центральное	ППМ	6396	24.1	830.3	3.1
Лукояновское*	ППМ	166	5.5	388.9	13.0
Западно-Сибирская мегапровинция					
Тарское	ППМ	1001	32.2	181.4	6.4
Самсоновское	ППМ	1674	34.2	256.6	5.2
Туганское	ППМ	2502	19.7	1007.3	7.7
Георгиевское	ППМ	1568	17.6	408.8	4.9

Примечание. \*Группа месторождений; \*\*погребенные прибрежно-морские (ППМ).

Ускоренная реализация отмеченных выше проектов добычи литиевых руд в 2023–2030 гг. позволит в значительной степени обеспечить внутренние потребности в литиевом сырье и экспорт.

**Титан.** Минералы-носители титанового сырья – ильменит, рутил и лейкоксен (полиминеральный агрегат окислов титана и железа с кремнеземом). В незначительных количествах титан извлекается из лопарита попутно с редкими металлами. Около 95% титанового сырья потребляется в виде диоксида – для производства эрозионностойких красителей, материалов и отбеливателей, и только 5% – в металлургическом переделе.

Россия располагает одной из крупнейших в мире МСБ – 587.4 млн т TiO<sub>2</sub>, что составляет 15% мировых запасов. При этом вклад страны в мировое производство концентратов титана составляет всего 3.1 тыс. т (0.03%), при этом Россия остается одним из ведущих производителей в мире изделий из металлического титана (30%) (ПАО “Корпорация ВСМПО-АВИСМА” и ОАО “Соликамский магниевый завод”) и пигментного диоксида титана (ООО “Титановые инвестиции”) за счет импорта титановых концентратов.

Российская сырьевая база титана включает месторождения четырех основных геолого-промышленных типов: магматогенные в основных породах (216.8 млн т TiO<sub>2</sub> или 36.9% балансовых запасов страны), магматогенные в щелочных породах (55.4 млн т TiO<sub>2</sub>; 9.4%), литифицированные погребенные россыпи (297.2 млн т TiO<sub>2</sub>; 50.6%), прибрежно-морские погребенные россыпи (17.8 млн т TiO<sub>2</sub>; 3%).

В мире около 30% диоксида титана добывается из коренных месторождений, таких как Лак-Тио

в Канаде (содержание TiO<sub>2</sub> 32–38%), Теллнесс в Норвегии (содержание TiO<sub>2</sub> 16–20%) и Панчжихуа в Китае (содержание TiO<sub>2</sub> 10–12%) (Charlier et al., 2015). Содержание титана в рудах российских магматогенных месторождений 7.0–8.5%, что при наличии проблем с технологией обогащения и переработки делает их разработку нерентабельной.

Погребенные прибрежно-морские циркон-рутил-ильменитовые россыпи, как и во всем мире, наиболее привлекательны для освоения, так как они достаточно легко обогатимы, из них добывается около 70% мирового титана. Параметры основных циркон-рутил-ильменитовых россыпей России приведены в табл. 2.

Текущая годовая потребность российских предприятий в титановых концентратах (исходя из их мощностей) составляет около 365 тыс. т (Госдоклад ..., 2022). Сосредоточенного в россыпных месторождениях диоксида титана (17.8 млн т) достаточно для обеспечения текущих потребностей России на 50 лет.

Кроме того, источником сырья для производства пигментного диоксида титана для лакокрасочного производства, которое выдвигает определенные требования к качеству ильменита, могут служить титаносодержащие песчаники девонских отложений юго-восточного склона Воронежской антеклизы (Лаломов и др., 2023).

До недавнего времени до 95% потребностей России покрывались за счет импорта украинского титанового сырья, и только в последний год поставки диверсифицировались за счет Вьетнама, Мозамбика и Казахстана. Ввод в эксплуатацию в 2022 г. Туганского россыпного месторождения в Томской области снизил зависимость отечественной промышленности от импорта ти-



Фиг. 7. Продуктивный пласт Константиновского участка Бешпагирского месторождения.

танового сырья. К 2030 г. объем производства ильменитового концентрата на этом предприятии может закрыть 40% текущих потребностей, а рутилового – 80% (Госдоклад ..., 2022).

Динамика роста цены на пигментный диоксид – от 1.9 долл/кг в 2016 до 2.98 в 2022, на губчатый титан – от 7.1 до 12.1 долл/кг указывает на перспективность инвестиций в титановое сырье.

Среди месторождений нераспределенного фонда недр наиболее перспективными для освоения являются погребенные прибрежно-морские россыпи Ставропольского края: Бешпагирское месторождение, Константиновский и Камбулатский участки (фиг. 4). Их совокупные запасы, качественные показатели потенциальной продукции и инфраструктурная освоенность региона позволяют создать на их базе крупное горно-обогатительное производство. Наиболее изучено Бешпагирское месторождение, в рудных песках которого содержится в среднем  $24.73 \text{ кг/м}^3 \text{ TiO}_2$  (фиг. 7). Получаемый из них ильменитовый концентрат (62.2%  $\text{TiO}_2$ ) подходит для производства губчатого титана и пигментного диоксида титана. Цирконовый концентрат (64.5%  $\text{ZrO}_2$ ) удовлетворяет требованиям существующего производства циркония, в том числе ядерной чистоты. Технико-экономические показатели отработки запасов открытым способом определены для 15-летнего расчетного периода со среднегодовым производством товарных концентратов: цирконового – 15 тыс. т, рутилового – 10 тыс. т, ильменитового – 28 тыс. т (Быховский и др., 2010). Освоение ме-

сторождения сдерживает его расположение на территории частного землевладения.

**Ниобий, РЗМ.** Россия располагает одной из крупнейших сырьевых баз редких металлов, которые включают в себя РЗМ, однако единственный промышленный источник ниобия и редкоземельной продукции в стране – лопаритовый концентрат, производимый из руд Ловозерского месторождения в Мурманской области. В результате вклад России в мировое производство РЗМ-сырья составляет порядка 1%. Ниобий – важнейший металл, пользующийся высоким спросом в России; высокий риск Nb-поставок связан с тем фактом, что более 90% его производства приходится на одну страну (Бразилию).

За исключением Ловозерского месторождения, локализованного в слоистом щелочном магматическом массиве, все месторождения, на которых в настоящее время ведется добыча ниобия, расположены в карбонатитах, и большинство потенциально-перспективных для освоения месторождений также залегают в этих породах.

Государственным балансом запасы ниобия учтены в 39 месторождениях, в распределенном фонде числится 9 месторождений, в 7 объектах ниобий – попутный компонент, который не извлекается (Быховский и др., 2016, 2017, 2019). Рынок ниобия определяется двумя сегментами: соединениями ниобия и металлургическим ниобием. ОАО «СМЗ» полностью покрывает потребности отечественной промышленности в соединениях ниобия, импорт соединений ниобия отсутствует,

а порядка 40% экспортируется. Мощности ОАО “СМЗ” позволяют производить до 855 т соединений ниобия в пересчете на пентаоксид. В 2018 г. объем производства соединений ниобия составил 668.7 т в пересчете на пентаоксид.

Основные области применения ниобия: в виде феррониобия – для производства жаропрочных сталей; в виде пентоксида ниобия – для производства твердых сплавов, монокристаллов ниобата лития, в виде металла – для производства электролитических конденсаторов, сверхпроводниковой техники, материалов, используемых в оптике и акустоэлектронике. Потребление феррониобия в России оценивается на уровне 6000 т. Структура производства феррониобия в производстве сталей оценивается следующим образом: нефте- и газопроводы – 60%, мостостроение – 15%, автомобилестроение – 8%, судостроение – 7%, электротехника – 5%, прочее – 5%. В разрезе мирового потребления феррониобия на конструкционную сталь приходится 46%, сталь для автомобилестроения – 23%, сталь для трубопроводов – 16%, нержавеющая сталь – 6%, иное – 9%.

В сегменте металлического Nb и его сплавов обратная ситуация. АО “Чепецкий механический завод” – единственный производитель ниобия и его сплавов. Предприятие производит порядка 40–50 т продукции для собственных нужд и в целях поставок предприятиям государственной корпорации по атомной энергии “Росатом”. В незначительных объемах Nb металлический производит АО “Химико-металлургическая компания”.

Для удовлетворения текущих годовых потребностей российской металлургии, по оценке Минпромторга, достаточно 3000–3500 т феррониобия. Свыше 95% феррониобия импортируется в РФ из Бразилии. Кроме того, в Россию импортируется металлический Nb в виде: прутков, проволоки, труб и чистого металла. Так, в 2018 г. объем импорта феррониобия (содержание Nb – 60%) составил порядка 4.1 тыс. т (Стратегия..., 2018).

Государственным балансом запасов полезных ископаемых учитываются запасы в количестве 26.9 млн т  $\Sigma TR_2O_3$  (суммы окиси редких земель), что позволяет стране занимать второе место в мире, уступая только Китаю. Запасы (млн т): Китай – 55, Бразилия – 22, США – 18, Индия – 3.1, Австралия – 2.2. Однако доля России в мировом производстве редкоземельных металлов (РЗМ) составляет 2.4%, тогда как Китай – 83%, Австралия – 11.1%, Индия – 1.4%. Всего учтено 17 месторождений РЗМ, из них 10 – в распределенном фонде недр, в том числе одно техногенное.

Российская сырьевая база РЗМ базируется, в основном, на месторождениях апатит-нефелиновых и лопаритовых руд в недрах Мурманской области (Северо-Западный федеральный округ). Здесь в девяти апатит-нефелиновых месторожде-

ниях Хибинской группы учтено 10.7 млн т РЗМ, или почти 40% российских запасов. Месторождения разрабатываются на фосфатное сырье, при этом РЗМ, как попутный продукт, не извлекаются, при низком среднем содержании в рудах (0.24–0.42%  $\Sigma TR_2O_3$ ). Применяемое для производства РЗМ лопаритовое и апатитовое сырье богаты РЗМ легкой группы (80–95%), но бедны РЗМ средней (0.1–5%) и тяжелой (0.01–0.1%) групп.

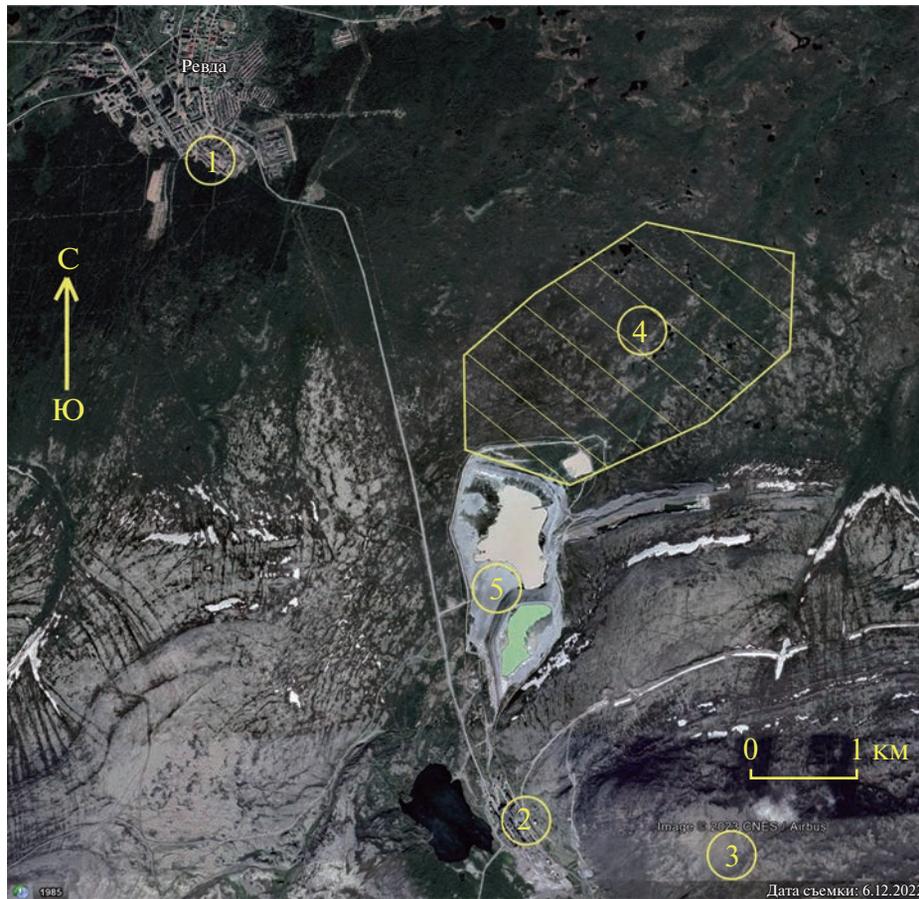
Наибольший интерес вызывают Ловозерское (лопарит), Томторское (монацит) и Хибинские (апатит) месторождения, существенно различающиеся по содержанию РЗМ в рудах. Кроме того, в нераспределенном фонде недр находится 6 месторождений, в том числе одно техногенное. Попутное извлечение РЗМ возможно из апатитовых руд Селигдарского месторождения (Якутия) и из апатит-ниобиевых руд Белозиминского месторождения (Иркутская область) (Госдоклад, 2022).

Следует отметить отсутствие технологий утилизации и вторичной переработки продукции, содержащей РЗМ, а также технологии возврата этого сырья в производство (Быховский и др., 2016, 2017, 2019). Планируется наладить извлечение РЗМ из отходов, вскрышных и вмещающих пород, продуктов переработки апатитового концентрата (фосфогипса, экстракционной фосфорной кислоты), богатых средней и тяжелой группой (Стратегия..., 2018).

Совокупный объем добычи РЗМ в России не превышает 2.5 тыс. т в год, что больше, чем в США (1.9 тыс. т), но меньше, чем в Австралии (2.6 тыс. т) или Китае (129.4 тыс. т.). При этом общий объем внутреннего потребления РЗМ в РФ в 2020 году составил 420 тонн, из которых 100 т пришлось на АО “Росэлектроника”, еще 300 т – на “Ростех”, до 20 т – на прочие крупные технологические корпорации, в том числе холдинг “Швабе”. Остальной объем добытых РЗМ отправлен на экспорт (Госдоклад ..., 2022).

Однако электронная промышленность России испытывает дефицит РЗМ, особенно на уровне продукции первого и второго переделов, что и обуславливает критичный уровень зависимости от импорта. В первую очередь из Китая, Тайваня, Малайзии и других стран АТР.

Отметим, что развитие зеленых технологий только за последние 15 лет увеличило спрос на РЗМ в мире в 10 раз. Таким образом, имеющиеся в России запасы не осваиваются по причине ограниченности внутреннего спроса, а спрос не увеличивается из-за отсутствия достаточного объема предложения готовой продукции, а эта продукция не создается из-за отставания России в области собственного производства элементной базы. В результате реальная добыча РЗМ в России ведется только на Ловозерском месторождении в Мурманской области.



**Фиг. 8.** Схема строения Северо-Ловозерского редкометального узла. 1 – поселок Ревда, 2 – обогатительная фабрика Карнасурт, 3 – коренное месторождение Карнасурт, 4 – Сергеванская россыпь лопарита, 5 – хвостохранилище Карнасурт.

Перспективы импортозамещения по Nb и PЗЭ связаны со следующими месторождениями (включающими коры выветривания): Томторским (участок Буранный) в Республике Саха-Якутия (начало эксплуатации предполагается в 2028 г.) и Зашихинском в Иркутской области (начало эксплуатации в 2025 г.), а также с увеличением производства продукции Ловозерским ГОКом.

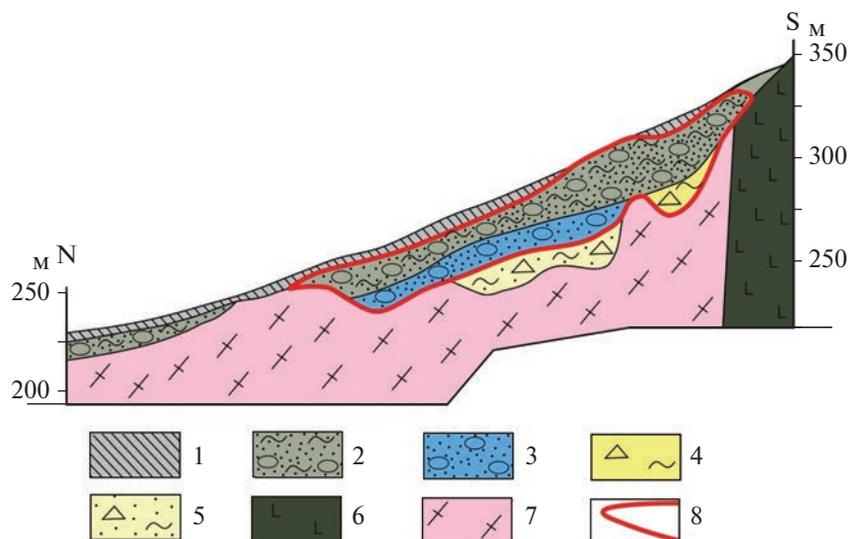
Актуальным выглядит увеличение в несколько раз производства Ловозерским ГОКом за счет вовлечения в переработку новых видов сырья (россыпного и техногенного). Следует отметить, что в последние годы на Ловозерском месторождении добыча ведется в сложных горно-геологических условиях при низкой рентабельности существующих разрезов, причем по мере выработки доступных ресурсов сложность горных работ и себестоимость продукции увеличивается.

Уникальные по своему составу и генезису, достаточно крупные по масштабу россыпи лопарита – главного источника Nb, Ta, PЗМ и Ti – расположены по периферии Ловозерского массива, а также хвосты обогащения фабрики Карнасурт

(фиг. 8), могут служить дополнительным источником сырья для объема производимой продукции Лавозерским ГОКом. При этом ассортимент получаемой продукции не требует изменения технологии металлургического передела и будет достигнуто частичное самообеспечение по СМС, критически зависимого от импорта.

Россыпи лопарита (фиг. 9.) приурочены, в основном, к гляциальным и флювио-гляциальным отложениям – производным местного горного оледенения (Лаломов и др., 2022). Наиболее изучена Ревдинская группа россыпей (Шомиокская, Ревдинская и Сергеванская россыпи).

Среднее содержание лопарита в россыпях Ревдинской группы –  $3.9 \text{ кг/м}^3$ . Вскрышные породы составляют 11.5 м при мощности пласта 20.7 м, что позволяет добывать россыпь открытым карьером. При производительности ГОКа в 2021 г. 2.6 тыс. т PЗМ, только одна, наиболее благоприятная для эксплуатации, Сергеванская россыпь, расположенная в нескольких километрах от обогатительной фабрики, может обеспечить произ-



**Фиг. 9.** Обобщенный разрез рыхлых отложений северного склона и предгорий Ловозерского массива. 1 – морена покровного оледенения  $gQ_{III^3-IV^1}$ ; 2 – морена горного оледенения с обломками местных щелочных пород  $gQ_{III^1-2}$ ; 3 – флювиогляциальные отложения горного оледенения  $fgQ_{III^1-2}$ ; 4 – склоновые отложения кайнозоя (неогена?) с обломками местных щелочных пород ( $dN(?)$ ); 5 – элювиально-склоновые отложения мезозоя-кайнозоя (?), развитые по породам гранитогнейсового комплекса ( $e-d MZ-N(?)$ ); 6 – палеозойские щелочные породы (PZ); 7 – породы гранитогнейсового архейского комплекса (AR); 8 – россыпь лопарита.



**Фиг. 10.** Хвостохранилище обогатительной фабрики Карнасурт Ловозерского ГОКа (фото А.В. Лаломова).

водство лопаритового концентрата на уровне текущего объема в течение 68 лет.

Техногенные отложения сосредоточены в хвостохранилищах Карнасурт-1 и Карнасурт-2, где

складируются хвосты обогащения начиная с 1951 г (фиг. 10). По последним данным за 2021 г. (Госдоклад ..., 2022), содержание лопарита в хвостах составляет  $8.4 \text{ кг/м}^3$ ,  $\Sigma PZM - 2.7 \text{ кг/м}^3$ . По предва-

рительной оценке, запасы РЗМ в хвостохранилищах могут оцениваться в 75–80 тыс. т, лопарита – 230–250 тыс. т.

Таким образом, проблема с исходным обеспечением российских потребностей в РЗЭ может быть решена полностью, но потребуются достаточно масштабное развитие внутреннего спроса за счет расширения производства электронной элементной базы и создания новых предприятий, выпускающих высокотехнологичную продукцию, использующую РЗЭ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммируя изложенное выше, отметим, что по большинству позиций из всего утвержденного в 2022 г. Правительством РФ обновленного Перечня СМС проблемы зависимости от импорта не наблюдается. В то же время 17 необходимых для российской промышленности полезных ископаемых импортируются, причем 5 из них (Mn, Ti, Nb, Li, REE) критически зависят от импорта. Несмотря на это, многие отечественные комплексные месторождения импортозависимых СМС не разрабатываются.

Как показывает многолетний опыт СССР по вводу в строй и эксплуатацию россыпных месторождений золота и олова, а также рассмотренный выше пример Туганского ГОКа, быстрыми темпами самообеспечение по ряду импортозависимых видов СМС (Zr, Ti, Nb, Ta, REE, Li и др.) может быть достигнуто за счет освоения россыпных месторождений, кор выветривания и техногенного сырья.

Выполненный в статье анализ (в плане импортозамещения) для первоочередного освоения позволяет рекомендовать следующие объекты: Nb, Ta, Ti, REE – лопаритовые россыпи Ревдинской группы и техногенные отложения в хвостохранилищах Ловозерского ГОКа (Кольский полуостров); Ti, Zr – Итмановский участок Лукояновского россыпного месторождения и Бешпагирское месторождение.

Следует отметить, что по ряду позиций Перечня, например, марганцу, хрому, литию и бокситам, существуют объективные причины импортозависимости. В настоящее время Россия не в состоянии перейти на полное самообеспечение по этим видам СМС. По ним самообеспечение может быть достигнуто в среднесрочной и долгосрочной перспективе лишь при разработке новых технологий, повышающих степень технологического передела минерального сырья низкорентабельных отечественных месторождений.

Отечественное производство критически зависит от использования готовых концентратов или полуфабрикатов, чаще всего производимых в недружественных России странах, оказавшихся

под мощным политическим и экономическим давлением коллективного Запада. Для исключения угрозы перекрытия каналов поставок СМС из этих стран в ближайшей перспективе необходим поиск новых поставщиков из дружественных стран БРИКС, Юго-Восточной Азии и Африки.

## 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., Лобанов К.В., Волков А.В., Галямов А.Л., Викентьев И.В., Тарасов Н.Н., Дистлер В.В., Лаломов А.В., Аристов В.В., Мурашов К.Ю., Чижова И.А., Чефранов Р.М.* Месторождения стратегических металлов Арктической зоны. Геология рудн. месторождений. 2015. Т. 57. № 6. С. 479–500.
- 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 рудн. 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 рудн. месторождений. 2022. Т. 64. № 6. С. 617–633.
- Быховский Л.З., Васильев А.Т., Забирко А.Г.* О проекте освоения Бешпагирского комплексного россыпного редкометалло-титанового месторождения // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2010. № 1. С. 68–75.
- Быховский Л.З., Потанин С.Д., Котельников Е.И.* О перспективах и очередности освоения минерально-сырьевого потенциала редкоземельного и скандиевого сырья России // Разведка и охрана недр. 2016. № 8. С. 3–8.
- Быховский Л.З., Потанин С.Д., Чеботарева О.С.* Минерально-сырьевая база редких металлов // Минеральные ресурсы России: Экономика и управление. 2017. № 4. С. 28–37.
- Быховский Л.З., Пикалова В.С., Лихникевич Е.Г.* Редкоземельное и скандиевое сырье: алгоритм освоения природных и техногенных источников // Минерально-сырьевая база металлов высоких технологий. М.: ВИМС, 2019. С. 24–34.
- Государственный доклад “О состоянии и использовании Минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году”. М.: ВИМС, 2022. 622 с.
- Кульбас А.А.* Отчет о результатах контрольного мероприятия “Оценка эффективности управления государственным фондом недр в 2018–2019 годах и истекшем периоде 2020 года в целях устойчивого обеспечения базовых отраслей экономики страны видами минерального сырья, ресурсы которых недостаточны и обеспечиваются в том числе за счет импорта” М.: Счетная палата Российской Федерации, 2021. 52 с.

- Лаломов А.В., Григорьева А.В., Зайцев В.А.* Минеральный состав редкометалльных россыпей Ловозерского массива // Геология рудн. месторождений. 2022. № 5. С. 485–497.  
<https://doi.org/10.31857/S0016777022050069>
- Лаломов А.В., Григорьева А.В., Милаш А.В., Черешинский А.В.* Титаноносные туфопесчаники ястребовской свиты (верхний девон) юго-востока Воронежской антеклизы как возможная альтернатива ильменитового сырья Иршинского месторождения (Украина) // Горный журнал. 2023. № 2. С. 15–19.
- Мелентьев Г.Б.* Литиевый потенциал России // Редкие земли. 2016. Интернет ресурс <http://rareearth.ru/ru/pub/20160613/02898.html>.
- Отчет о прикладных научных исследованиях по теме № 2014-14-576-0118-002 “Разработка эффективной технологии комплексного освоения высокопараметрических минерализованных гидрогеотермальных ресурсов”. Махачкала: ИПГ ДНЦ РАН, 2014. 70 с.
- Стратегия развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года, утверждена Правительством Российской Федерации от 22 декабря 2018 г. № 2914-р. 2018. 30 с. <http://static.government.ru/>
- Стратегия развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2030 года. Распоряжение Правительства РФ от 28.12.2022 N 4260-р. 2022. 55 с. [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru)
- Coulomb, R., Dietz, S., Godunova, M., Nielsen, Th. B.* Critical minerals today and in 2030: an analysis of OECD countries // OECD Environment working papers. 2015. № 91. P. 1–49. [www.oecd.org/environment/workingpapers.htm](http://www.oecd.org/environment/workingpapers.htm)
- Charlier, B., Namur, O., Bolle, O., Latypov, R., Duchesne, J.-C.* Fe–Ti–V–P ore deposits associated with Proterozoic massif-type anorthosites and related rocks // Earth-Sci. Rev. 2015. V. 141. P. 56–81.
- Mineral Commodity Summaries 2021. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2022. 202 p.

УДК 553.04(470)

## МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ ПОТЕНЦИАЛ СТРАТЕГИЧЕСКИХ ОСТРОДЕФИЦИТНЫХ ВИДОВ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

© 2023 г. О. В. Петров<sup>а, \*</sup>, А. В. Молчанов<sup>а, \*\*</sup>, В. В. Шатов<sup>а, \*\*\*</sup>, Т. Н. Зубова<sup>а, \*\*\*\*</sup>

<sup>а</sup>Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского,  
Средний пр., д. 74, Санкт-Петербург, 199106 Россия

\*E-mail: vsmdir@vsegei.ru

\*\*E-mail: Anatoly\_Molchanov@vsegei.ru

\*\*\*E-mail: Vitaly\_Shatov@vsegei.ru

\*\*\*\*E-mail: Tatiana\_Zubova@vsegei.ru

Поступила в редакцию 19.05.2023 г.

После доработки 28.05.2023 г.

Принята к публикации 29.05.2023 г.

В статье кратко охарактеризована государственная система регионального геологического изучения недр, реализуемая “Роснедра” и ФГБУ “ВСЕГЕИ” и обеспечивающая оценку минерально-сырьевого потенциала страны на стратегические виды минерального сырья. В 2022 году во ВСЕГЕИ была завершена работа по созданию комплекта цифровых монометалльных карт закономерностей размещения и прогноза стратегических и остро дефицитных видов полезных ископаемых Российской Федерации масштаба 1 : 2500000 в ГИС-формате. По этим видам полезных ископаемых проведена оценка запасов по данным государственной системы учета и выполнена экспертная переоценка прогнозных ресурсов. В результате были выработаны региональные прогнозные критерии локализации площадей, перспективных на выявление месторождений. Даны рекомендации по постановке ГДП-200/2 и (или) ГМК-200 на конкретных номенклатурных листах, перспективных для осуществления ГРП поисковой стадии на стратегические виды минерального сырья.

*Ключевые слова:* Россия, минерально-сырьевая база, стратегические металлы, минерагенический анализ, рекомендации

DOI: 10.31857/S0016777023050064, EDN: WCPGTA

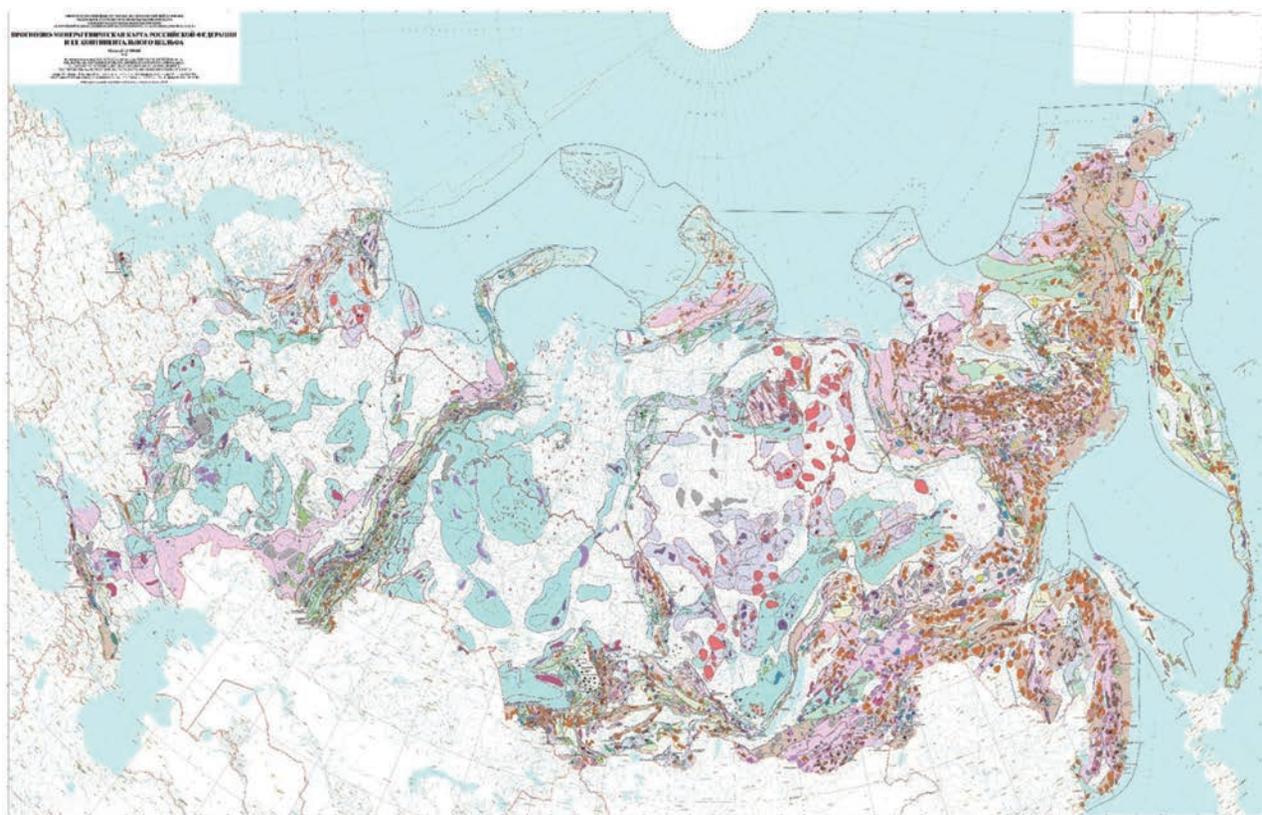
### ВВЕДЕНИЕ

Настоящая статья написана по материалам доклада, подготовленного авторами для конференции “Лаверовские чтения-2023: Металлы и минералы при переходе к зеленой энергетике”.

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ФГБУ “ВСЕГЕИ”) является головным отраслевым институтом Федерального агентства по недропользованию, и в этой связи следует напомнить, что Николай Павлович Лаверов почти 17 лет курировал отраслевые институты Министерства геологии СССР. Какое-то время он также руководил Всесоюзным геологическим фондом Мингео СССР, где по его инициативе была улучшена система учета ресурсов и государственного баланса минерального сырья. Опыт, полученный Николаем Павловичем в Министерстве

геологии, во многом и способствовал успешной его работе на посту вице-президента Российской академии наук.

Прежде всего следует упомянуть, как оценка минерально-сырьевого потенциала России реализована в нашем институте. С момента образования Геолкома-ВСЕГЕИ, которому 31 января 2023 года исполнился 141 год, в институте исторически сложились две научные школы: *регионального геологического изучения недр и региональных металлогенических исследований*. В развитие металлогенической школы Геолкома-ВСЕГЕИ существенный вклад внесли академики С.С. Смирнов, Д.С. Коржинский, Д.В. Наливкин, Д.В. Рундквист, А.Д. Щеглов и члены-корреспонденты академии наук Ю.А. Билибин, П.М. Татаринов, Л.И. Красный.



**Фиг. 1.** Прогнозно-минерагеническая карта Российской Федерации и ее континентального шельфа масштаба 1 : 2500000 (Петров и др., 2017).

### ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА РЕГИОНАЛЬНОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИЗУЧЕНИЯ НЕДР

Школы *регионального геологического изучения недр и региональных металлогенических исследований* неразрывно связаны между собой, дополняют друг друга и успешно реализуют свой научный потенциал в рамках Государственной программы регионального геологического изучения недр с созданием государственных геологических карт на 3-х масштабных уровнях.

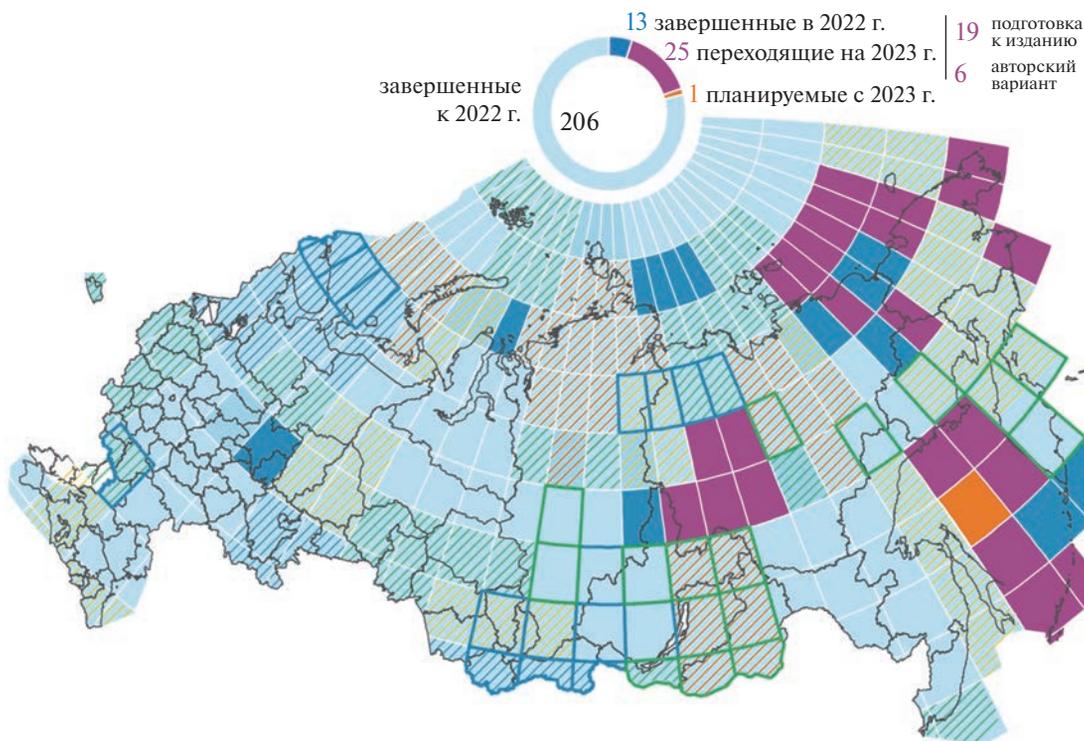
Во все комплекты государственных геологических карт входят карты закономерностей размещения и прогноза полезных ископаемых, которые на каждом масштабном уровне имеют свои объекты исследования и решают свои задачи прогнозирования перспективных площадей:

- на *сводном и обзорном уровне* геологического картографирования в мониторинговом режиме ведется актуализация цифровой прогнозно-минерагенической карты Российской Федерации и ее континентального шельфа масштаба 1 : 2500000. Основными объектами исследования здесь являются металлогенические провинции, зоны, рудные районы и узлы (фиг. 1).

Эта карта, отражая на новой основе лучшие традиции ленинградской металлогенической школы, является одним из достижений системы минерагенического районирования и научной основой прогнозирования различных видов полезных ископаемых нашей страны. Развитие этих исследований базируется сегодня на современной плейттектонической основе с использованием данных глубинного сейсмического зондирования и бурения сверхглубоких параметрических скважин. Данное направление металлогенических исследований тесно связано с нелинейной металлогенией, основоположником которой был академик Алексей Дмитриевич Щеглов.

- на *мелкомасштабном уровне* создается современная полистная геологическая основа недропользования в масштабе 1 : 1000000 уже третьего поколения (фиг. 2) с оценкой минерально-сырьевого потенциала крупных минерагенических зон, рудных районов, узлов и осадочных бассейнов.

Каждое новое поколение карт этого масштабного уровня создается через 25–30 лет и таким образом происходит переоценка минерально-сырьевого потенциала России в мониторинговом режиме, что чрезвычайно важно, т.к. информационный ресурс этих карт интегрирует в себе не



Фиг. 2. Государственное геологическое картографирование территории Российской Федерации и ее континентально-го шельфа.

только информацию, содержащуюся в Государственном кадастре месторождений и рудопроявлений, но и информацию о еще нераскрытом минерально-сырьевом потенциале недр нашей страны. А сегодня это более 52 тысяч перспективных объектов. Нераскрытый потенциал, в том числе стратегических и остродефицитных видов минерального сырья, приходится на слабо освоенные регионы нашей страны, такие как Арктическая зона и Дальневосточный федеральный округ.

Поскольку карты масштаба 1 : 1000000 третьего поколения охватывают прибрежную сушу, шельф и глубинные акватории, в рамках этого масштабного уровня получило развитие еще одно направление металлогенической школы ВСЕГЕИ – минерагения осадочных бассейнов.

– на *среднемасштабном уровне* ведется геологическое доизучение отдельных площадей в масштабе 1 : 200000 с целью раскрытия минерально-сырьевого потенциала прогнозируемых рудных районов и узлов с выделением новых объектов “поискового задела”. Этот ресурс содержит информацию о 2.5 тысячах перспективных участков недр и размещен в открытом доступе на сайте ФГБУ “ВСЕГЕИ”. Он представляет собой основу развития системы лицензирования в России, в том числе и по заявительному принципу. Нужно заметить, что лицензионную деятельность недропользователей стимулирует уже сам факт поста-

новки и проведения государством региональных геолого-съёмочных работ. Так, в Хабаровском крае в пределах только одной площади после постановки ГДП-200 (N-54-XXXI, Бараки-Баканская площадь) количество распределенных участков недр за последние 3 года возросло в 2 раза. На смежной площади уже на начальных стадиях опережающих геофизических и геохимических работ появился целый ряд новых лицензий. А общее количество лицензий за три года выросло в 2.5 раза по сравнению с предыдущим пятнадцатилетним периодом. Всего в 2018–2022 гг. на площадях проведения региональных геолого-съёмочных работ Роснедрами было выдано около 1000 лицензий.

Необходимо особо подчеркнуть, что все государственные геологические карты сопровождаются объяснительными записками, которые по сути представляют собой полноценные монографии, включающие всестороннее описание геологического строения, истории геологического развития и закономерностей размещения полезных ископаемых. За 140 лет государственного геологического картографирования территории страны создано около 5 тысяч таких монографий в виде объяснительных записок к картам различных поколений и более 17 тыс. отчетов к картам 1 : 50000 масштаба. На основе современных цифровых технологий мы объединили весь этот гео-

лого-картографический ресурс в единый национальный информационно-технологический комплекс “Цифровой двойник Недр России”. Этот комплекс обеспечивает цифровую технологию создания современных основ недропользования, прогноза и поисков месторождений полезных ископаемых — от полевых работ до электронного представления геологической информации и управления фондом недр. Он включает в себя более 100 тысяч геологических карт и объяснительных записок к ним, а также структурированные массивы данных по полезным ископаемым России. Комплекс увязан с Единым фондом геологической информации, Автоматизированной системой лицензирования недр, данными Государственного кадастра месторождений и Государственного баланса запасов.

Кроме того, в этот комплекс включены и результаты изотопно-геохимического и геохронологического изучения магматических и метаморфических пород. Эти данные объединены нами в ежегодно актуализируемый “Геохронологический атлас-справочник”, куда входят и данные Российской академии наук.

Интернет-публикация геолого-картографического ресурса “Цифровой двойник Недр России” на сайте ВСЕГЕИ сделала его доступным для многомиллионной аудитории пользователей. Количество запросов к нему в последнее время превысило 100 млн.

Заканчивая характеристику государственной системы регионального геологического изучения недр, реализованную в системе “Роснедра” и нашем институте, следует ниже отразить, как эта система обеспечивает оценку минерально-сырьевого потенциала нашей страны.

В 2022 году ВСЕГЕИ завершил работу по составлению новых цифровых Карт закономерностей размещения и прогноза эпitherмальных золото-серебряных и большеобъемных черносланцевых месторождений золота, а также золото-медно-порфириновых месторождений (Петров и др., 2020). Следует подчеркнуть, что за участие в открытии ряда месторождений порфирирового семейства в Дальневосточном федеральном округе шести сотрудникам нашего института недавно было присвоено почетное звание “Первооткрыватель месторождения”.

Развивая научные основы прогноза золото-медно-порфирирового оруденения, сегодня в практику работ ВСЕГЕИ мы внедрили инновационные технологии анализа геохимических составов редких и редкоземельных элементов в акцессорных цирконах из магматических комплексов. Результаты этих исследований позволили разбраковать поисковые объекты на потенциально рудоносные и заведомо безрудные, тем самым сократив количе-

ство выделенных ранее перспективных объектов с 200 до 20, то есть более чем в 10 раз.

### ЦИФРОВЫЕ МОНОМЕТАЛЛЬНЫЕ КАРТЫ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАЗМЕЩЕНИЯ И ПРОГНОЗА СТРАТЕГИЧЕСКИХ И ОСТРОДЕФИЦИТНЫХ ВИДОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ РОССИИ МАСШТАБА 1 : 2500000. РЕСУРСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Кроме того, в 2022 году в институте была завершена работа по созданию комплекта цифровых монометалльных карт масштаба 1 : 2500000 закономерностей размещения и прогноза стратегических и остро дефицитных видов полезных ископаемых, таких как *марганец, хром, титан, цирконий, бериллий, литий и редкоземельные металлы* (фиг. 3). Остановимся на характеристике некоторых из них.

**Марганец.** Россия характеризуется крупной сырьевой базой марганцевых руд и входит в десятку мировых держателей их запасов. В то же время товарно-сырьевую продукцию наша страна не производит, а промышленность использует закупаемые за рубежом (Казахстан, ЮАР, Китай и другие страны) товарные марганцевые руды и ферросплавы (Государственный доклад, 2021), что обусловлено преобладанием в МСБ марганца России труднообогатимого карбонатного промышленного типа руд с содержанием металла до 20%. По данным (Машковцев и др., 2017), общий объем импорта в пересчете на сырые руды составляет 1500–1600 тыс. т, на металл — 655 тыс. т, общие затраты на импорт — 577 млн долл. США.

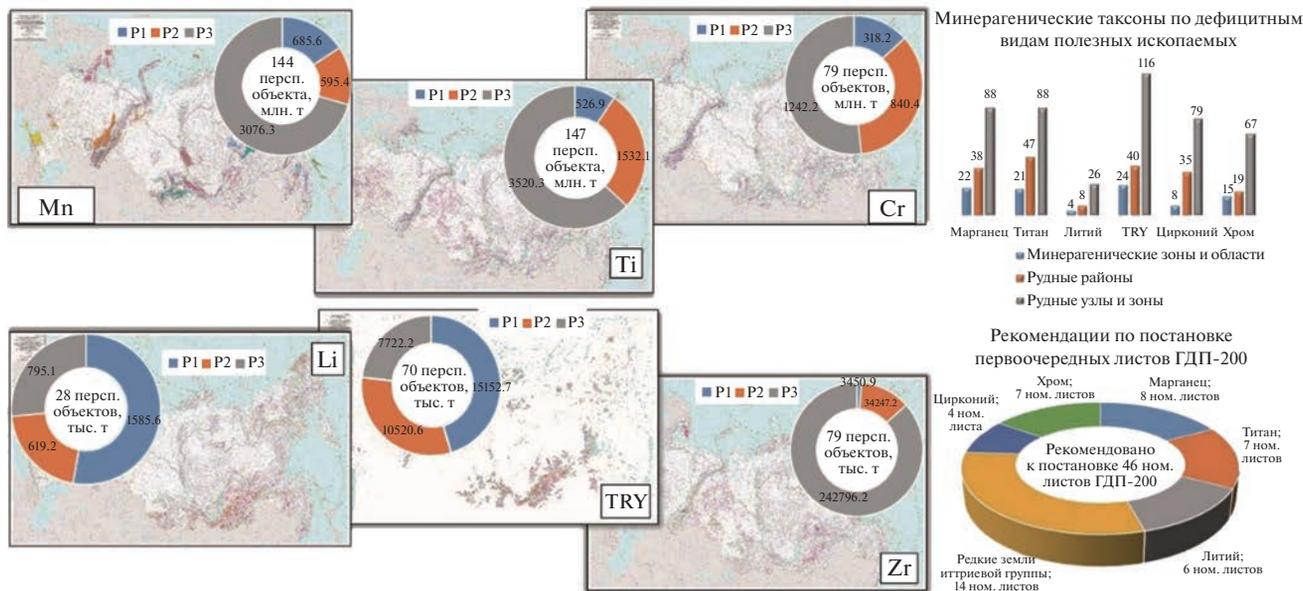
В настоящее время, начиная с 2013 года, в нашей стране промышленная разработка марганцевых месторождений не ведется. В 2017 г. началась только опытно-промышленная добыча, объемы которой в 2020 году составили 188 тыс. т (Государственный доклад, 2021).

На созданной во ВСЕГЕИ Карте закономерностей размещения и прогноза основных геолого-промышленных типов месторождений дефицитных полезных ископаемых территории РФ (*марганец*) масштаба 1 : 2500000 выделены специализированные на марганец минерагенические зоны, рудные районы и узлы в количестве 22, 38 и 88 соответственно. На основе экспертных оценок, выполненных в нашем институте, прогнозные ресурсы различных типов марганцевых руд на 144 минерагенических объектах России кратны превышают ресурсы, отраженные государственными системами учета (фиг. 4).

Наибольшее количество объектов выявлено в пределах Алтае-Саянской минерагенической провинции, являющейся также и лидером по сумме прогнозных ресурсов всех категорий. В ее

Сводное и обзорное геологическое картографирование

Карты закономерностей размещения и прогноза основных геолого-промышленных типов месторождений дефицитных полезных ископаемых по территории Российской Федерации масштаба 1 : 2500000



Фиг. 3. Карты закономерностей размещения и прогноза основных геолого-промышленных типов месторождений дефицитных полезных ископаемых по территории Российской Федерации масштаба 1 : 2500000.

пределах сосредоточено 26.53% от общероссийских ресурсов категории P<sub>1</sub>; 31.38% всех ресурсов категории P<sub>2</sub> и 27.61% ресурсов категории P<sub>3</sub>. На втором месте по прогнозным ресурсам марганцевых руд находится Уральская минерагеническая провинция, в пределах которой сосредоточено 2.87% ресурсов марганцевых руд категории P<sub>1</sub>, 32.28% ресурсов категории P<sub>2</sub> и 9.77% ресурсов марганцевых руд категории P<sub>3</sub>.

Кроме того, по данным государственного геологического картографирования выделены первоочередные объекты на наиболее перспективные геолого-промышленные типы марганцевых руд с учетом имеющихся в стране технологий обогащения. Основное количество прогнозных ресурсов категории P<sub>3</sub> сосредоточено в пределах перспективных площадей и рудных узлов в Западно-Сибирской, Пай-Хой-Новоземельской и Алтае-Саянской минерагенических провинциях, притом что основное количество объектов выявлено в Алтае-Саянской (23.53% объектов) и Уральской (26.47% объектов) провинциях. Прогнозные ресурсы категории P<sub>3</sub> локализованы преимущественно на участках большой площади с низкой изученностью и неясными перспективами марганцевой минерализации, в труднодоступных и неразвитых с инфраструктурной точки зрения территориях. Именно с данными площадями связан дальнейший прирост прогнозных ресурсов высших категорий и при весьма благоприят-

ной перспективе оцененных запасов, при проведении среднемасштабных и крупномасштабных геолого-съёмочных, геолого-минералогических и поисковых работ масштаба 1 : 200000 и 1 : 50000.

Значительный прирост перспективных площадей на марганец можно ожидать в пределах Восточно-Сибирской минерагенической провинции – в зонах стратиграфического несогласия юрских терригенных и палеозойских карбонатных комплексов пород в бассейне р. Лена.

Среди месторождений марганцевых руд наиболее перспективными являются месторождения формации кор выветривания; вулканогенно-карбонатно-терригенной и железо-марганцевой терригенно-кремнисто-карбонатной (парнокский тип), характеризующиеся браунитовым, пиролюзит-псиломелановым составом, благоприятными с точки зрения параметров оруденения и возможности получения Mn-концентратов. На них приходится 22.6% прогнозных ресурсов кат. P<sub>1</sub>, 41.5% прогнозных ресурсов кат. P<sub>2</sub> и 45.5% прогнозных ресурсов кат. P<sub>3</sub> от суммы прогнозных ресурсов по РФ.

К сожалению, освоение российских марганцеворудных объектов сдерживается отсутствием эффективных технологий обогащения и переработки низкокачественных руд, а также отсутствием инфраструктуры в районах локализации большинства перспективных объектов (Государственный доклад, 2021).

## Экспертная переоценка ресурсов марганцевых руд на 144 объектах



Фиг. 4. Результаты экспертной переоценки ресурсов марганцевых руд на 144 объектах.

**Хром.** Хромовые руды являются ценным сырьем металлургической, огнеупорной, химической и других отраслей промышленности. По объему потребления в России хромовые руды уступают лишь железным. Основным их потребителем является металлургическая промышленность (75–80%), в меньших объемах (10–15%) они применяются в химической промышленности и в других отраслях (3–5%) (Николаев и др., 2021). По объемам импорта товарных хромовых руд Россия занимает второе место в мире после Китая.

Балансовые запасы хрома России на 01.01.2021 составили 51.8 млн т, заключенные в недрах 33 коренных месторождений и группы россыпных, а оцененные ресурсы составляют около 250 млн т. При этом три четверти разведанных запасов и ресурсов являются неактивными по технологическим и экономическим причинам. Около 90% поставок хромовых руд в Россию обеспечивает Казахстан, остальное закупается в ЮАР и Турции.

Тем не менее, объемы производства хромовых ферросплавов позволяют стране входить в число основных мировых продуцентов, т.к. объемы производимого в России феррохрома превышают потребности отечественных металлургических комбинатов, что определило и определяет его значительный экспорт (Государственный доклад, 2021). Однако развитие отечественной хромовой промышленности сдерживается низким качеством руд (бедные 45–30% и убогие 30–10%) наиболее

крупных объектов (Аганозерское и Сопчеозерское месторождения), содержащих хромиты неметаллургического типа, освоение которых требует внедрения новых технологических решений обогащения и металлургического процессов.

В настоящее время промышленностью используются руды, не требующие обогащения с содержанием более 35%  $Cr_2O_3$ , но только четверть запасов РФ соответствует этому уровню. Запасы хромовых руд сосредоточены в Карело-Кольской минерагенической провинции, где сконцентрировано почти 70% балансовых запасов страны. Здесь находятся крупнейшие российские месторождения: Аганозерское в Республике Карелия и Сопчеозерское в Мурманской области, относящиеся к *стратиформному геолого-промышленному типу* и характеризующиеся убогими по содержанию  $Cr_2O_3$  рудами химического и огнеупорного типов. Остальные запасы учтены в недрах Уральского ФО, включая его арктическую зону, а также в Приволжском ФО. Уральские объекты относятся к *альпинотипному типу* (месторождения Центральное и Западное в Ямало-Ненецком АО). На среднем и южном Урале (Свердловская, Челябинская области, Пермский край) известны объекты *стратиформного, альпинотипного и россыпного типов*. Основное количество запасов хромовых руд здесь заключено в Главном Сарановском и Южно-Сарановском стратиформных месторождениях Пермского края, руды которых отно-

сятся к бедным (средние содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  составляют 39% и 37.7% соответственно).

На территории России в качестве разноранговых металлогенических подразделений, специализированных на хромовые руды, выделено 15 металлогенических зон, 19 рудных и потенциально рудных районов и 67 узлов. Причем подавляющее большинство этих подразделений расположены в Дальневосточном, Уральском и Приволжском ФО. По количеству же суммарных прогнозных ресурсов хромовых руд различных категорий лидируют Уральская минерагеническая провинция. В ее пределах сосредоточено 76.77% от общероссийских ресурсов категории  $P_1$ , 86.67% всех ресурсов категории  $P_2$  и 61.70% ресурсов категории  $P_3$ . На втором месте по прогнозным ресурсам хромовых руд находится Алтае-Саянская минерагеническая провинция, в пределах которой сосредоточено 3.14% ресурсов хромовых руд категории  $P_1$ , 12.97% ресурсов категории  $P_2$  и 28.65% ресурсов хромовых руд категории  $P_3$ . Кроме того, относительно высокими прогнозными ресурсами категории  $P_3$  хромовых руд обладает Алдано-Становая минерагеническая провинция (4.83% от общероссийских ресурсов этой же категории). В целом же прогнозные ресурсы хромовых руд России по 79 перспективным объектам, отраженным на составленной карте закономерностей размещения и прогноза основных геолого-промышленных типов месторождений дефицитных полезных ископаемых (хром) территории Российской Федерации масштаба 1 : 2500000, составляют:  $P_1$  — 318.2,  $P_2$  — 840.4 и  $P_3$  — 1242.2 млн т (фиг. 3).

В пределах Российской Федерации руды хрома относятся к четырем рудно-формационным типам — железорудная хром-никелевая кор выветривания, платино-хромитовая перидотит-пироксенит-габбро-норитовая, хромитовая дунит-пироксенит-габбровая, хромитовая дунит-перидотитовая, а также хромитовых россыпей. Причем в пределах Уральской минерагенической провинции выявлены месторождения практически всех рудных формаций России, а в пределах других провинций, как правило, только одной. Так, в пределах Алтае-Саянской и Алдано-Становой минерагенических провинций выявлены рудные объекты в основном хромитовой дунит-перидотитовой формации, в пределах Карело-Кольской минерагенической провинции — платино-хромитовой перидотит-пироксенит-габбро-норитовой формации.

Для пополнения поискового задела на хромовые руды, ФГБУ «ВСЕГЕИ» рекомендуется постановка ГРП ранних стадий на объекты альпино-тапного (подиформного) хромитового типа в гипербазитах, в пределах Уральской, Алтае-Саянской и Охотско-Корякской минерагенических провинций, а также рекомендуется постановка прогнозно-минерагенических работ на объекты

среднехромистого типа стратиформных месторождений в архейских зеленокаменных структурах Восточной Карелии. В настоящее время этот геолого-промышленный тип имеет высокие риски геологического изучения, однако является единственным потенциально способным обеспечить открытие средних и крупных по масштабу запасов объектов хрома с приемлемым качеством сырья.

**Титан.** Титан является ключевым элементом при разработке самых передовых технологий во многих странах мира, имея двойное назначение, являясь незаменимым в военной и гражданской авиации, при производстве истребителей, вертолетов, военно-морских кораблей, танков, баллистических ракет.

Главными производителями титанового сырья в мире являются Китай, Австралия, Канада и ЮАР, стабильно обеспечивающие около 60% мирового выпуска титана в концентратах.

Россия располагает одной из крупнейших в мире сырьевых баз титана, на долю которой приходится 15% мировых запасов, достаточной для обеспечения внутренних потребностей страны в титановом сырье. Фактором, сдерживающим освоение коренных месторождений титана, связанных с габброидными породами, является отсутствие в стране промышленной технологии переработки высоко титанистых титаномагнетитовых (железородных) концентратов, получаемых из руд этих месторождений вместе с ильменитовым (титановым) концентратом. Освоение россыпных месторождений затрудняется их комплексностью, осложняющей процесс переработки руды; не все извлекаемые из нее продукты находят своих потребителей, что отрицательно сказывается на рентабельности проектов. Отсюда понятно, почему вклад нашей страны в мировое производство концентратов титана составляет всего 0.03% (Государственный доклад, 2021).

Практически все российские предприятия, использующие титановое сырье, импортируют его. Однако это не мешает стране входить в тройку основных мировых продуцентов губчатого титана и быть крупнейшим продуцентом пигментного диоксида титана в Восточной Европе. Текущая годовая потребность российских предприятий в титановых концентратах составляет примерно 365 тыс. т. Практически полностью она обеспечивается импортом ильменитового (около 340 тыс. т), а также рутилового (около 12 тыс. т) концентратов. Отечественный (лопаритовый) концентрат, исходя из производительности Ловозерского ГОКа, может обеспечить всего около 13 тыс. т (Государственный доклад, 2021). По состоянию на 01.01.2021 балансовые запасы титана составили 606.9 млн т  $\text{TiO}_2$ . Они заключены в 18 коренных (97% запасов) и 15 россыпных ме-

сторождениях, еще два коренных и два россыпных месторождения содержат только забалансовые запасы (Машковцев и др., 2016; Ершова и др., 2016).

Анализируя минерагеническое районирование страны в целом, необходимо подчеркнуть, что преобладающее количество рудных районов и узлов, включая и потенциальные их разности, а соответственно и количество запасов и прогнозных ресурсов титановых руд, располагаются в административном отношении в пределах Дальневосточного, Сибирского и Уральского, а также Центрального и Северо-Западного Федеральных округов, слагая в пределах плитных комплексов древних и молодых платформ крупные россыпные концентрации, а в других геологических структурах (щиты древних платформ – Балтийский, Алданский), складчато-надвиговые структуры – Урал) формируют, в основном, коренные месторождения.

Промышленные месторождения титана Российской Федерации приурочены к двум группам геологических формаций: формации россыпей (прибрежно-бассейновых и пролювиально-дельтовых); и формации магматических и ультраметаморфических пород – габбро-анортозитовых, расслоенных (дифференцированных) и многофазных интрузий основного, ультраосновного и шелочно-ультраосновного состава.

Важным направлением ГРП должны стать поиски и оценка месторождений в габброидах с высоким содержанием в рудах ильменита при низком содержании титаномагнетита, на которых будет технологически возможно и экономически целесообразно получение только диоксида титана. Проявления подобного типа установлены в Карело-Кольском регионе и в Приморье.

В пределах территории Российской Федерации и ее континентального шельфа прогнозные ресурсы титановых руд и титана локализованы на 147 объектах, в сумме составляя: по категории  $P_1$  – 526.975 млн т, по категории  $P_2$  – 1 532.12 млн т и по категории  $P_3$  – 3 520.339 млн т (фиг. 3), без учета объектов, где прогнозные ресурсы подсчитаны на металлический Ti, Ti и Ti-Zr пески и ильменит.

Наибольший интерес в нашей стране представляют коренные руды титаномагнетитового и апатит-ильменит-титаномагнетитового геолого-промышленных типов, расположенных в Восточной Сибири. Номенклатурные листы, в пределах которых проявлены разноранговые рудные объекты, требующие в самое ближайшее время, во всяком случае до 2026 г., постановку ГДП-200/2 (или ГМК-200), как наиболее благоприятные в прогностическом плане, расположены в Алдано-Становой минерагенической провинции: Кодаро-Удоканская минерагеническая зона, Удоканский рудный узел с прогнозными ресурсами руд

(млн т)  $P_1$  – 1255;  $P_2$  – 300;  $P_3$  – 800, при средних содержаниях (%): Fe – 34.65;  $TiO_2$  – 6.27;  $V_2O_5$  – 0.54; в Алтае-Саянской минерагенической провинции: Малотагульский потенциальный рудный узел с прогнозными ресурсами руд (млн т)  $P_1$  – 1255;  $P_2$  – 300;  $P_3$  – 800, при средних содержаниях (%): Fe – 23.8;  $TiO_2$  – 5.26;  $V_2O_5$  – 0.18. Кроме того заслуживает внимания группа листов масштаба 1 : 200000, захватывающих Чогарский потенциальный рудный узел с прогнозными ресурсами Ti руд по категории  $P_3$  – 52 млн т, при содержаниях (%)  $TiO_2$  – 2–14,  $P_2O_5$  – 2–7, V – 0.01–0.3.

Однако фактором, сдерживающим освоение коренных месторождений титана, связанных с габброидными комплексами пород в нашей стране, является отсутствие промышленной технологии их переработки.

**Цирконий.** Области применения циркония достаточно обширны, что обусловлено его высокой износостойкостью и теплопроводностью, низкой степенью взаимодействия с другими металлами. Основным направлением использования циркония является производство керамических изделий (53.4%). Кроме того, его применяют в литейном производстве (13.6%), производстве огнеупорных кирпичей и прочих огнеупорных материалов (12.6%), в химической промышленности (14.8%), ядерной энергетике (0.5%), электронике (3%) и пр. (2.1%).

Россия обладает существенными балансовыми запасами циркония – 11.6 млн т. А забалансовые запасы оцениваются в 12.3 млн т. По их сумме Россия занимает третье место в мире после Австралии (31.86% мировых запасов) и Южной Африки (8.74% мировых запасов). На долю Украины, США, Индии и Бразилии приходится от 3 до 1% мировых запасов (Государственный доклад, 2021). Государственным балансом запасов России учитывается 17 месторождений циркония, из которых: 11 месторождений – россыпные, 5 – коренные, 1 – техногенное.

По сумме разведанных запасов циркония Россия занимает третье место в мире после Австралии и Южной Африки. Однако структура Российской сырьевой базы циркония существенно отличается от мировой, 95% которой представлено россыпными месторождениями. В России же на россыпи приходится только треть балансовых запасов, а две трети составляют запасы магматогенных объектов с труднообогатимыми комплексными рудами, локализованными в Республике Тыва и Забайкальском крае. Подобные им месторождения больше нигде в мире не разрабатываются.

Легкообогатимые россыпные месторождения в России имеют достаточно большую глубину залегания и низкое содержание диоксида цирко-

ния. Они получили развитие в пределах чехлов древних и молодых платформ территории России и не представляют значительного интереса с экономической точки зрения.

Среди коренных месторождений циркония наиболее перспективными являются рудные объекты, связанные с крупными расчлененными и дифференцированными массивами ультраосновного и ультращелочного состава.

Экспорт циркония России составляет около 95% от объема добычи (в Европу, Японию, Китай и США). В то же время внутренний спрос на цирконий составляет 8–9 тыс. т в год. Иными словами, потребность российских предприятий в цирконе удовлетворяется исключительно за счет импорта (Государственный доклад, 2021).

В пределах территории Российской Федерации и ее континентального шельфа прогнозные ресурсы циркония в пересчете на диоксид циркония на 01.01.2022, исходя из сведений Госгеолкарт-1000/3 и ГК-200/2 (прошедших апробацию НРС Роснедр), данных кадастра прогнозных ресурсов категорий  $P_3$  ФГБУ “ВСЕГЕИ” и прогнозных ресурсов категорий  $P_1$  и  $P_2$  кадастра ФГБУ “ЦНИГРИ”, данных СПР за 2022 г., оценены и апробированы на 44 объектах по категории  $P_1$  – 3450.9 тыс. т, категории  $P_2$  – 34247.2 тыс. т и категории  $P_3$  – 242796.2 тыс. т руд (фиг. 3). Апробированные прогнозные ресурсы циркония превышают суммарные балансовые запасы в 5.5 раз, а разведанные категорий  $A + B + C_1$  – в 11 раз (Левченко и др., 2021). При этом наиболее перспективными объектами по суммарному количеству прогнозных ресурсов циркония являются Алдано-Становая минерагеническая провинция, Катугинский циркониево-редкоземельно-редкометалльный рудный узел с прогнозными ресурсами категории  $P_2$  – 7738.2 тыс. т  $ZrO_2$ , включающий месторождение циркон-пироклор-криолитовых руд Катугинское цирконий-редкоземельно-ниобий-танталовой фельдшпатолитовой рудной формации; Восточно-Сибирская минерагеническая провинция, Ессейский цирконий-железородно-апатитовый узел с суммарными прогнозными ресурсами категории  $P_1$  – 1823.1 тыс. т  $ZrO_2$  апатит-редкоземельно-цирконий-тантал-ниобиевой карбонатитовой формации и Карело-Кольская минерагеническая провинция, Ковдорский апатит-железородный узел с прогнозными ресурсами диоксида циркония в 300 тыс. т цирконий-редкоземельно-ниобий-танталовой фельдшпатолитовой рудной формации.

Анализ созданного ГИС-проекта “Карта закономерностей размещения и прогноза месторождений дефицитных полезных ископаемых (цирконий) территории Российской Федерации масштаба 1 : 2500000”, проявленность на ее полотно прогнозных критериев разноформационных ти-

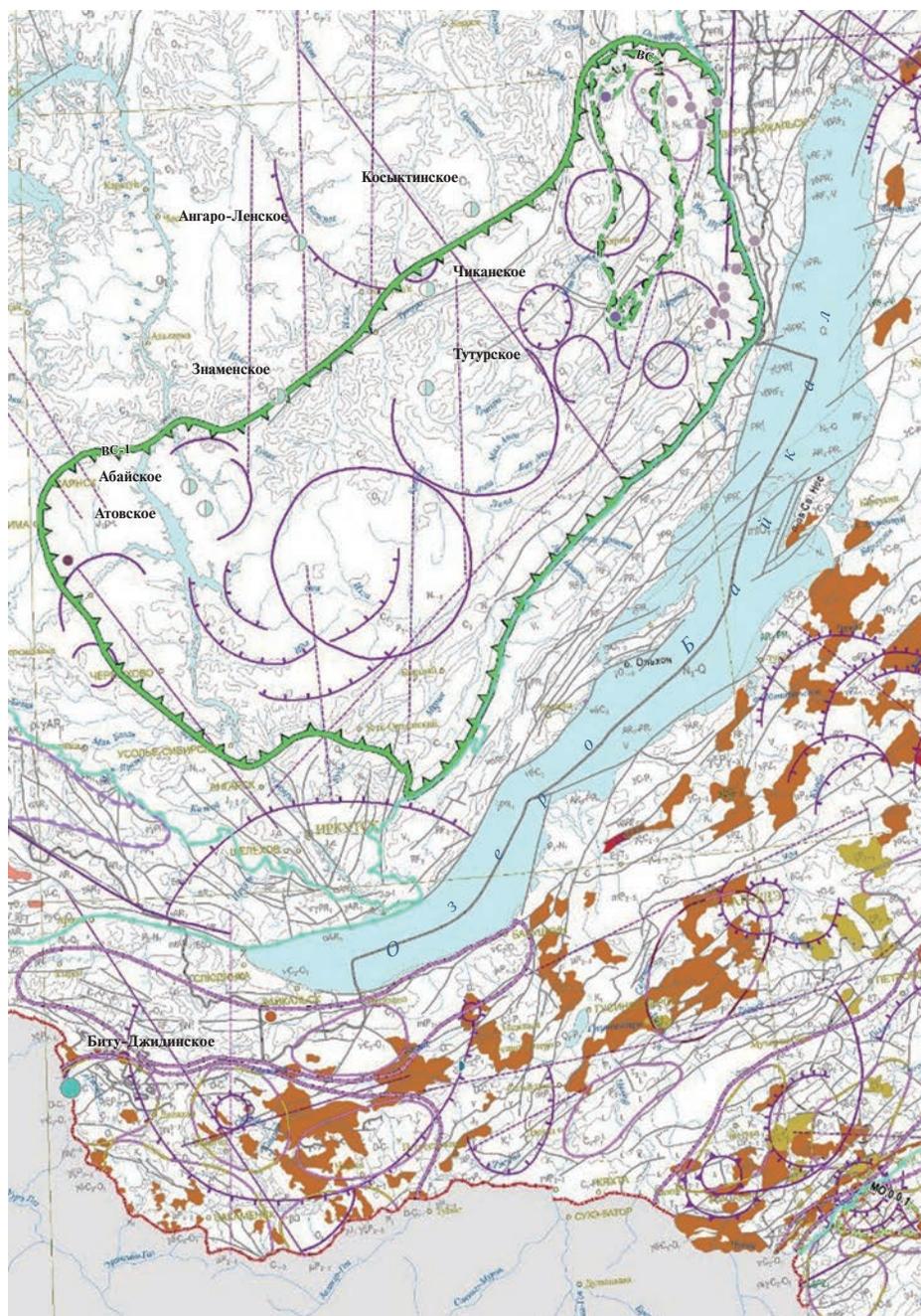
пов циркониевого оруденения, позволили наметить листы масштаба 1 : 200000 для постановки ГДП-200/2 и (или) ГМК-200, как наиболее благоприятные для локализации месторождений циркония, рекомендованные для проведения работ до 2026 года. В пределах Восточно-Сибирской минерагенической провинции – Ессейский рудный узел (Лист R-48-XXV) и Алдано-Становой минерагенической провинции – Ингилийский потенциальный рудный узел (Лист O-53-XVI).

*Литий* – один из наиболее востребованных военными и гражданскими отраслями промышленности редких металлов, без него не могут обойтись ядерная и военная промышленности. Он используется практически во всех батареях современных устройств, в том числе в тяговых аккумуляторах электроавтомобилей. Литий также может использоваться в термоядерной энергетике. К 2030 году электрическая мощность АЭС в России может увеличиться до 60 ГВт (21 ГВт в 2000 г.), а доля атомной энергетики в производстве электроэнергии возрастет более чем на 33% (Редкие земли, 2016). В настоящее время прогнозируется взрывной спрос на данный металл, что обусловлено развитием новых технологий.

Наиболее крупные месторождения лития известны в гранитных пегматитах<sup>1</sup> натролитиевого типа. Он также концентрируется в гидротермальных образованиях, для которых характерна его тесная связь со фтором. Кроме того, он концентрируется и в осадочных образованиях, при преобразовании литийсодержащих минералов в зоне гипергенеза, в том числе в рапе соляных озер.

За последние полвека в мире были открыты десятки крупнейших месторождений лития с запасами от 1 до 11 млн тонн  $Li_2O$ , и в настоящее время за рубежом до 70% лития производится за счет эксплуатации рассолов и рапы бессточных соляных озер с содержаниями 0.06–0.5% – гидроминеральный источник (Мелентьев, 2016). В России гидроминеральные источники лития известны в месторождениях Иркутского региона (автономные источники глубинных высокоминерализованных вод), Республики Коми (попутные воды объектов нефтегазодобычи), Республики Саха (Якутия) – геотермы, сопутствующие рассолы нефтегазовых, алмазных месторождений и др., а также в Крыму, Дагестане, Ставропольском крае, Астраханской и Оренбургской областях (Ключарев и др., 2021). Крупные слабо разведанные запасы лития в РФ связаны с пластовыми рассолами в районах разведочных и добычных работ на углеводородное сырье в Восточной Сибири. К настоящему времени, по мнению специалистов ФГБУ ИМГРЭ, наиболее реальным гидроминеральным

<sup>1</sup> Среднее содержание  $Li_2O$  в рудах гранитных пегматитов составляет 1.1–3.0%.



**Фиг. 5.** Фрагмент карты закономерностей размещения и прогноза основных геолого-промышленных типов месторождений дефицитных полезных ископаемых — *литий*, территории Российской Федерации масштаба 1 : 2500000. (Жигаловская минерагеническая зона Восточно-Сибирской минерагенической провинции).

ресурсом лития представляются глубинные рассолы Ангаро-Ленского бассейна в пределах Жигаловской минерагенической зоны (фиг. 5), где известно 35 скважин с самоизливающимися рассолами. Рассолы содержат Mg, Ca, Br, Li, Sr.

Первый литиевый рудник на территории России был введен в эксплуатацию еще в 1941 году в Восточном Забайкалье на Завитинском месторождении сподумена (0.5–0.6%  $\text{Li}_2\text{O}$ ). Это пред-

приятие, проработавшее 56 лет, было законсервировано в 1997 году в связи с изменением экономической ситуации в России. И с конца 1990-х гг. отсутствие собственной литиевой продукции компенсировалось ее импортом. Очевидно, что реализация импортозамещения лития и других ценных компонентов гидроминерального сырья в нашей стране возможна за счет ускоренного вовлечения в комплексное промышленное исполь-

зование новых месторождений в Иркутской, Астраханской, Архангельской областях и Республики Коми.

По запасам лития Россия занимает одно из ведущих мест в мире. Государственным балансом запасы лития учтены в 17 месторождениях. В распределенном фонде числится 4 месторождения, однако литиевые месторождения не разрабатываются и литиевое сырье на территории Российской Федерации в настоящее время не производится (Бортников и др., 2022).

С 2020 по 2022 год в отделе металлогении ФГБУ «ВСЕГЕИ» изучались пространственно-временные закономерности распределения литиевого оруденения по территории Российской Федерации. Составлен ГИС-проект «Карта закономерностей размещения и прогноза основных геолого-промышленных типов месторождений лития территории Российской Федерации масштаба 1 : 2500000».

Прогнозные ресурсы  $\text{Li}_2\text{O}$ , отраженные в материалах комплектов Госгеолкарт-1000/3 и ГК-200/2 (прошедших апробацию НРС Роснедр), данных кадастра прогнозных ресурсов категории  $P_3$  ФГБУ «ВСЕГЕИ» и прогнозных ресурсов категорий  $P_1$  и  $P_2$  кадастра ФГБУ «ЦНИГРИ», данных СПР за 2022 г., по территории Российской Федерации локализованы на 28 объектах по категориям  $P_1$  – 1585.6 тыс. т, категории  $P_2$  – 619.2 тыс. т, категории  $P_3$  – 795.1 тыс. т.

Наиболее перспективные объекты расположены в:

– Алтае-Саянской минерагенической провинции: Тастыгский рудный узел, прогнозные ресурсы оксида лития составляют по категориям:  $P_1$  – 176 тыс. т,  $P_2$  – 210 тыс. т,  $P_3$  – 8 тыс. т, локализованные в формации литиевых (сподуменовых) пегматитов; Сольбельдырский прогнозируемый рудный узел, прогнозные ресурсы оксида лития по категориям:  $P_1$  – 100 тыс. т,  $P_2$  – 150 тыс. т,  $P_3$  – 250 тыс. т, локализованные также в формации литиевых (сподуменовых) пегматитов.

– Алдано-Становой минерагенической провинции: Ерюсский потенциальный рудный узел с прогнозными ресурсами оксида лития по категориям  $P_1$  – 200 тыс. т,  $P_2$  – 180 тыс. т,  $P_3$  – 300 тыс. т (формация литиевых (сподуменовых) пегматитов). Урикско-Ийская золото-ураново-редкометалльная рудоносная зона с прогнозными ресурсами оксида лития по категориям:  $P_1$  – 550 тыс. т, локализованные в формации редкометалльных, литиеносных редкометалльных, оловорудных пегматитов.

– Байкальской минерагенической провинции: Джелтулинская потенциальная рудная зона с прогнозными ресурсами оксида лития  $P_1$  – 47 тыс. т,  $P_3$  – 33 тыс. т, локализованные в формации ред-

коземельно-редкометалльная апогранитов и щелочных метасоматитов.

– Верхояно-Колымской минерагенической провинции: Арга-Ынах-Хайский рудный узел. Прогнозные ресурсы оксида лития составили по категориям:  $P_1$  – 2.03 тыс. т,  $P_2$  – 99.61 тыс. т. Локализованы в формации редкоземельно-редкометалльных апогранитов и щелочных метасоматитов.

Среди месторождений лития наиболее перспективными на территории России являются месторождения следующих рудных формаций: литиевых (сподуменовых) пегматитов, редкоземельно-редкометалльных апогранитов и щелочных метасоматитов, а также широко разрабатываемое за рубежом, но слабоизученное в пределах России оруденение поверхностной и близповерхностной редкометалльной рапы (формация литиеносных растворов, литиеносная галогенная формация).

Из номенклатурных листов масштаба 1 : 200000 наиболее перспективными на выявление промышленного объекта являются три группы, в пределах которых может быть рекомендована постановка ГДП-200 и ГМК-200:

– Группа листов М-47-ХIII, -XIX, -XX, Алтае-Саянская минерагеническая провинция, Тастыгский рудный район, Тастыгский и Сольбельдырский рудный узлы.

– Группа листов N-48-VI, -XII, Восточно-Сибирская минерагеническая провинция, Жигаловская минерагеническая зона, Юхтинский потенциальный рудный район. Суммарные прогнозные ресурсы категории  $P_2 + P_3$  составляют около 120 тыс. т лития. Литиевая галогенная формация.

– Лист N-47-XXX, Алтае-Саянская минерагеническая провинция, Урикско-Ийский рудный район.

Анализируя минерагеническое районирование страны в целом, необходимо подчеркнуть, что преобладающее количество рудных районов и узлов, включая и потенциальные их разности, а соответственно количество запасов и прогнозных ресурсов лития, располагаются в минерагенических позициях щитов древних платформ, аккреционно-коллизивно-активноокраинных, чехлов молодых и древних платформ, в том числе активизированных, располагающихся в административном отношении в основном в пределах Дальневосточного, Сибирского, Уральского и Северо-Западного Федеральных округов.

**Редкоземельные металлы.** Однозначным лидером по производству РЗМ и их поставкам на мировой рынок является Китай — единственная страна, осуществляющая поставки всех видов редкоземельной продукции от сырья до готовых продуктов.

Россия располагает крупной сырьевой базой редкоземельных металлов (РЗМ), включая РЗМ иттриевой группы, входящие в перечень приоритетных видов стратегического минерального сырья, которые в значительных объемах завозятся из-за рубежа и являются особо важными для отечественной промышленности (Распоряжение Правительства РФ от 30.09.2022 № 2473-р.) Следует подчеркнуть, что в настоящее время без использования редкоземельных металлов практически невозможна разработка и существование всех ресурсо- и энергосберегающих технологий – солнечная энергетика, сверхскоростной транспорт на магнитной подушке, инфракрасная оптика, оптоволоконная электроника, лазеры, ЭВМ последних поколений. При этом в России товарная добыча РЗМ ведется в ограниченном количестве. Освоение известных объектов сдерживают отсутствие в стране эффективных промышленных производств по переработке руд и концентратов, низкий внутренний спрос и высокая конкуренция со стороны Китая. В результате внутреннее потребление редкоземельной продукции полностью обеспечивается вынужденным импортом (Государственный доклад, 2021).

Сырьевая база редкоземельных металлов Российской Федерации характеризуется высокой территориальной концентрацией в пределах Мурманской области (фиг. 6) и связана с промышленной разработкой находящегося здесь Ловозерского месторождения. Помимо этого, до 45% разведанных запасов редкоземельных металлов в стране приходится на рудные объекты в карбонатитовых массивах, расположенных, прежде всего, на территории Сибирского и Дальневосточного ФО – Томторское месторождение в Республике Саха (Якутия), Чуктуконское в Красноярском крае и Белозиминское в Иркутской области. Наиболее перспективные по количеству прогнозных ресурсов объекты находятся в Восточно-Сибирской, Алтае-Саянской и Верхояно-Колымской минерагенических провинциях.

Редкоземельные элементы иттриевой группы концентрируются в щелочных гранитоидах с эгирином, арфведсонитом, рибекитом и биотитом. Часто интенсивная иттриевая минерализация наблюдается в гранитных пегматитах, альбититах и грейзенах.

Несмотря на то что при выветривании многие иттриевые минералы устойчивы к разрушению и формируют россыпи, фториды и силикаты иттрия при химическом выветривании переходят в форму неустойчивых водных карбонатов и фосфатов. Главным же источником РЗМ тяжелой группы в настоящее время являются глины с ионносорбированными РЗМ<sup>2</sup>, добываемые в Китае.

<sup>2</sup> В месторождениях в ионно-абсорбционных глинах заключено 80% (1.5 млн т) мировых запасов среднетяжелых лантаноидов и иттрия. Содержание оксидов РЗМ в таких рудах в среднем составляет 0.03–0.2%.

Обеспеченность суммарными запасами редкоземельных металлов России при текущем уровне погашения запасов в недрах составляет более 253 лет. Извлечение осуществляется из 2% добываемых руд. Незначительный объем потребляемой отечественными предприятиями продукции практически полностью покрывается за счет импорта в основном из ОАЭ и Китая. Это обусловлено отсутствием в России производств по разделению РЗМ, а также в связи с низким уровнем спроса на конечную продукцию, востребованную в высокотехнологичных отраслях – электроники, оптики, специальной керамики и сплавов, постоянных магнитов, электромобилей, ветрогенераторов (Государственный доклад, 2021).

По состоянию на 01.01.2021, балансовые запасы РЗМ составили 31.8 млн т  $\Sigma TR_2O_3$ , которые заключены в 17 коренных месторождениях; еще одно месторождение содержит только забалансовые запасы. Кроме того, учитываются два техногенных месторождения с суммарными запасами 12.9 тыс. т  $\Sigma TR_2O_3$ .

Основные запасы редкоземельных металлов России сосредоточены в Северо-Западном, Дальневосточном и в меньшей степени Сибирском ФО, апатит-нефелиновых, лопаритовых промышленных типах месторождений и руд, а также в корах выветривания по карбонатитовым массивам и редкометалльным рудам. Общероссийские запасы редкоземельных руд на 01.01.2022 составляют: балансовые – 28780.6 тыс. т ( $A + B + C_1 + C_2$ ), забалансовые – 11602.52 тыс. т. Прогнозные ресурсы по 70 перспективным объектам составляют по категориям  $P_1$  – 15152.7 тыс. т,  $P_2$  – 10520.6 тыс. т,  $P_3$  – 7722.2 тыс. т (фиг. 3).

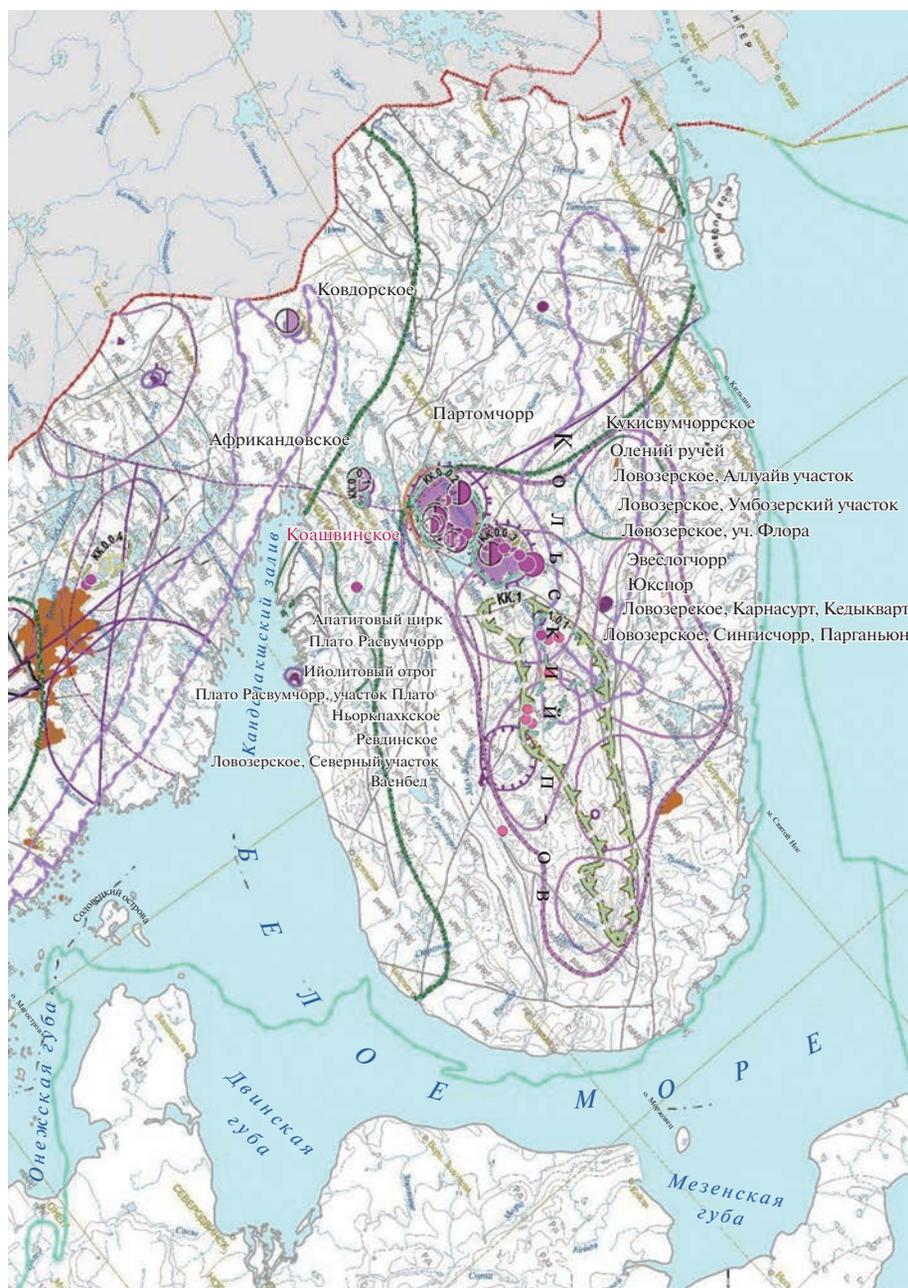
Наиболее перспективные по количеству прогнозных ресурсов объекты расположены в:

– Восточно-Сибирской минерагенической провинции, Уджинской минерагенической зоны с прогнозными ресурсами  $TR_2O_3$  (тыс. т):  $P_1$  – 12700;  $P_2$  – 3920;  $P_3$  – 2430.

– Алтае-Саянской минерагенической провинции, Карасугском железо-редкоземельном узле с прогнозными ресурсами  $TR_2O_3$  (тыс. т):  $P_1$  – 115;  $P_2$  – 3700; Улатайском железо-редкоземельном узле с прогнозными ресурсами  $TR_2O_3$  (тыс. т):  $P_2$  – 1000

– Верхояно-Колымской минерагенической провинции, Хаминском рудном узле с прогнозными ресурсами  $TR_2O_3$  (тыс. т):  $P_1$  – 1133;  $P_3$  – 1699; Горноозерском рудном узле с прогнозными ресурсами  $TR_2O_3$  (тыс. т):  $P_1$  – 1240.

Следует подчеркнуть, что среди месторождений редкоземельных элементов наиболее перспективными являются месторождения редкоземельно-цирконий-тантал-ниобиевой нефелин-сиенитовой; апатит-железородной щелочно-уль-



**Фиг. 6.** Фрагмент цифровой карты закономерностей размещения основных геолого-промышленных типов месторождений дефицитных полезных ископаемых – редкоземельные металлы, территории Российской Федерации масштаба 1 : 2500000. (Карело-Кольская минерагеническая провинция).

трамафит-карбонатитовой и апатит-редкоземельно-цирконий-тантал-ниобиевой карбонатитовой рудных формаций. При этом существенно иттриевый состав РЗЭ характерен для объектов типа рудопоявления Мироновское (Уральская минерагеническая провинция) с прогнозными ресурсами  $TR_2O_3$  категории  $P_3$  в 93 тыс. т.

Наиболее перспективными из номенклатурных листов на выявление промышленного объекта являются пять групп листов, в пределах ко-

торых могут быть рекомендованы постановка ГДП-200 и ГМК-200:

1. Лист О-46-VIII, Алтае-Саянская минерагеническая провинция, Кийский потенциальный рудный узел. Прогнозные ресурсы категории  $P_2$  – 35.4 тыс. т  $TR_2O_3 + ThO_2$
2. Группа листов О-49-XXVIII, -XXXIII, Байкальская минерагеническая провинция, Сынный-Бурпалинский потенциальный рудный узел.

3. Лист R-50-IX, Восточно-Сибирская минерагеническая провинция, рудный узел Богдо, Томторский рудный узел, с прогнозными ресурсами  $TR_2O_3$  (тыс. т):  $P_1 - 12700$ ;  $P_2 - 3920$ ;  $P_3 - 2430$ .

4. Группа листов R-48-VIII, -XII, -XIII, -XVI, -XIX, -XXII, -XXIV, -XXV, Восточно-Сибирская минерагеническая провинция, Анабарский щит.

5. Группа листов R-47-XVII, -XVIII, -XXIV, Восточно-Сибирская минерагеническая провинция, Маймечка-Котуйская минерагеническая зона. Чангитский, Далбыха-Бор-Уряхский рудные узлы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Заканчивая настоящую статью, следует коснуться ряда общих проблем состояния и воспроизводства в нашей стране минерально-сырьевой базы стратегических и остродефицитных видов полезных ископаемых. Как видно из приведенных выше материалов, одной из общих проблем эффективного освоения МСБ России является отсутствие или недостаточная разработанность отечественных технологий переработки минерального сырья. Сегодня лидерами по общему объему расходов на исследования и разработки в этом направлении являются США, Германия, Швейцария и Япония. В России в сфере развития высоких технологий переработки минерального сырья наблюдается значительное отставание. Эта ниша в системе Госрегулирования оказалась ниже незаангажированной. В последнее время Федеральное агентство по недропользованию обратило внимание на эту проблему и пытается решать ее силами подведомственных институтов. "...В целом сырьевая база Российской Федерации конкурентоспособна в мировом масштабе, позволяет сформировать на собственной территории отрасль полного технологического цикла от добычи до конечных изделий" (Димухамедов и др., 2021).

В качестве другой, не менее важной проблемы воспроизводства минерально-сырьевой базы, можно назвать *исчерпание поискового задела* по многим видам полезных ископаемых. Необходимо отметить, что из-за недостатка финансирования поисковой составляющей при государственном геологическом картографировании масштаба 1 : 200000 многие выделенные перспективные площади с ресурсами категории  $P_3$  остаются сегодня недоизученными. Поэтому в дальнейшем на этих площадях мы считаем целесообразным проведение 3-й стадии крупномасштабных региональных геолого-съемочных работ масштаба 1 : 50000 и 1 : 25000, что позволит локализовать в их пределах перспективные участки ранга потенциальных рудных полей с ресурсами категории  $P_2$ . В этой связи необходимо подчеркнуть, что регио-

нальные геолого-съемочные работы всегда являлись основой воспроизводства минерально-сырьевой базы страны, а недостаточное внимание к региональному этапу геологического изучения недр приводило и приводит к дефициту прогнозных площадей и кризису воспроизводства минерально-сырьевой базы, хотя наличие поискового задела, выраженного в локализованных и оцененных прогнозных ресурсах, является необходимым условием долговременного развития МСБ.

Сегодняшние проблемы воспроизводства минерально-сырьевой базы во многом связаны с тем обстоятельством, что из стадийности региональных работ практически исключены общие поиски и крупномасштабное геологическое картографирование. Хотя еще Приказом Мингео СССР № 169 1982 года этот масштабный уровень был определен как основной для регионального изучения страны и выделения перспективных площадей с локализованными ресурсами категорий  $P_1$  и  $P_2$ . Геологической съемкой этого масштабного уровня в количестве 17 тысяч листов были охвачены все основные горнорудные районы России. По своему содержанию эти работы относятся к стадии "общих поисков". По их результатам были открыты сотни новых месторождений.

В ныне действующей *Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации* мы полностью потеряли эту стадию "общих поисков" и сразу же столкнулись с исчерпанием "поискового задела". Считаем, что проведение ГДП-и ГМК-50 в виде геолого-минерагенического доизучения ранее заснятых площадей за счет средств, направляемых Государством в настоящее время на поиски, позволит решить проблему воспроизводства минерально-сырьевой базы страны на уровне эффективного использования бюджетных средств и привлечения частных инвестиций.

Никакие внесмасштабные минерагенические исследования, которые сегодня под видом региональных работ практикуют многие компании, никогда не решат этой задачи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л. и др.* Минеральные ресурсы высокотехнологичных металлов в России: состояние и перспективы развития // Геология руд. месторождений. 2016. Т. 68. № 2. С. 97–119.
- Государственный доклад о состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году. МПР РФ. М., 2021. 568 с.
- Димухамедов Р.Р., Хромова Е.А.* Минерально-сырьевая база металлов высоких технологий. Освоение, воспроизводство, использование // Проблемные вопросы добычи и производства редких и редкоземельных

металлов: Вторая науч.-практ. конф. Сборник докладов. 7–8 декабря 2021 г., М., 2021. С. 139–144.

*Ершова Е.В., Зублюк Е.В., Криштопа О.А., Лантева А.М., Ремизова Л.И., Руднев А.В.* Минерально-сырьевая база черных и легирующих металлов России // Разведка и охрана недр. 2016. № 9. С. 88–95.

*Ключарев Д.С., Михеева Е.Д.* Литий и попутные компоненты в промышленных водах перспективных площадей территории России // Минерально-сырьевая база металлов высоких технологий. Освоение, воспроизводство, использование: Науч.-практ. конф. Сборник докладов. М., 2020. С. 97–105.

*Левченко Е.И., Ключарев Д.С.* Оценка минерально-сырьевого потенциала металлов высоких технологий и уровень изученности (категорийности) // Минерально-сырьевая база металлов высоких технологий. Освоение, воспроизводство, использование: Вторая науч.-практ. конф. Сборник докладов. М., 2021. С. 190–201.

*Машковцев Г.А., Хижняков Ю.А., Козловский Д.С., Самойлов В.Ю., Фадеева А.А.* // Разведка и охрана недр. 2017. № 2. С. 3–10.

*Машковцев Г.А., Быховская Л.З., Ремизова Л.И., Чеботарева О.С.* Об обеспечении промышленности России титановым сырьем // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2016. № 5. С. 9–15.

*Николаев В.И., Казеннова А.Д., Никольская Н.Е. и др.* Хромитоносные провинции и месторождения хромовых руд России // Минеральное сырье. № 4. М.: ВИМС, 2021. С. 185.

*Петров О.В., Морозов А.Ф., Молчанов А.В., Шатов В.В. и др.* Прогнозно-минерагеническая карта Российской Федерации масштаба 1:2 500 000 как отражение прогнозно-поисковой эффективности региональных геологических исследований // Регион. геология и металлогения. № 70. 2017. С. 5–16.

*Петров О.В., Молчанов А.В., Терехов А.В., Шатов В.В. и др.* Карта закономерностей размещения золото-медно-порфириновых месторождений России масштаба 1 : 2500000 (на основе обобщения результатов работ по составлению комплектов государственных геологических карт масштаба 1:1 00 000 третьего поколения) // Регион. геология и металлогения. № 84. 2020. С. 5–24.

УДК 622.7:669.85/86

## ИННОВАЦИОННЫЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫЕ ПРОЦЕССЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РЕДКИХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ КОМПЛЕКСНЫХ РУД СЛОЖНОГО ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА

© 2023 г. В. А. Чантурия<sup>а</sup>, \*, А. И. Николаев<sup>б</sup>, \*\*, Т. Н. Александрова<sup>с</sup>, \*\*\*

<sup>а</sup>ИПКОН РАН им. Н.В. Мельникова, Москва, Россия

<sup>б</sup>Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева  
Кольского научного центра РАН, Академгородок, д. 26а, Апатиты, Россия

<sup>с</sup>Санкт-Петербургский горный университет,  
Васильевский остров, 21 линия, д. 2, Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: vchan@mail.ru

\*\*E-mail: a.nikolaev@ksc.ru

\*\*\*E-mail: Aleksandrova\_TN@pers.spmi.ru

Поступила в редакцию 16.05.2023 г.

После доработки 23.05.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

Показаны отечественные и мировые тенденции вовлечения в переработку руд редких и редкоземельных металлов (РЗМ). Показано, что главным направлением инновационной деятельности является разработка и применение современных прорывных технологий комплексной переработки минерального сырья с получением высококачественных продуктов при минимизации экологического ущерба. Систематизированы основные месторождения редких и РЗМ с позиций содержания основных компонентов, минералов-концентраторов и основных методов обогащения. Приведены основные принципиальные технологические схемы переработки некоторых месторождений РМ и РЗМ России (Ловозерского, Томторского, Африкандского месторождений). Рассмотрены варианты вовлечения в переработку техногенного и забалансового сырья с целью извлечения стратегических металлов. Обосновано, что в настоящее время в России активно разрабатываются инновационные экологически безопасные процессы извлечения редких и редкоземельных металлов из комплексных руд сложного вещественного состава.

*Ключевые слова:* редкие металлы, редкоземельные элементы, обогащение, гидрометаллургия, селективное разделение, техногенное сырье

DOI: 10.31857/S0016777023050040, EDN: WDADJW

### ВВЕДЕНИЕ

Согласно стратегии развития минерально-сырьевой базы (МСБ) РФ (Распоряжение от 22 декабря 2018 г. №2914-р.), эффективное развитие высокотехнологичных производств, включая атомную промышленность, радиоэлектронику, самолетостроение, космическую отрасль, “зеленую” энергетику, возможно только при достаточно полном обеспечении промышленности такими стратегическими металлами, как: Re, Be, Nb, Ta, Ti, In, Zr, Hf, Li, РЗЭ иттриевой группы, Cd, Ga и др. Для успешного развития и дальнейшей модернизации отечественной промышленности необходимо обеспечить экономическую составляющую РФ стратегическими металлами (Распоряжение Правительства РФ от 30 августа 2022 г. №2473-р.). Инновационная деятельность — одна из основных тенденций развития минерально-

сырьевой базы, главным направлением которой является разработка и применение современных прорывных технологий комплексной переработки минерального сырья с получением высококачественных продуктов при минимизации экологического ущерба (Бортников и др., 2022; Litvinenko, Sergeev, 2019; Литвиненко и др., 2023).

Месторождений, характеризующихся высоким содержанием редких металлов (РМ) и редкоземельных элементов (РЗЭ), в совокупности с экономической целесообразностью их добычи и переработки, достаточно мало, в связи с чем актуальны исследования, связанные с изучением распределения РЗЭ для различных типов месторождений и сырья (Бортников и др., 2007, 2008; Горячев и др., 2008).

Легкие										Тяжелые						
21 Sc Scandium 44.956	39 Y Yttrium 88.906	57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium [145]	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.045	71 Lu Lutetium 174.967
Классификация редкоземельных элементов																
Цериевая группа										Иттриевая группа						
57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium [145]	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.045	71 Lu Lutetium 174.967	39 Y Yttrium 88.906	21 Sc Scandium 44.956

Фиг. 1. Классификации редкоземельных элементов.

### ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МСБ РМ И РЗМ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ВОВЛЕЧЕНИЯ В ПЕРЕРАБОТКУ

Редкоземельные элементы представляют собой группу из 17 элементов, в которую включены 15 элементов лантаноидов (порядковые номера 57–71 ряд La–Lu), а также скандий и иттрий, имеющие порядковые номера 21 и 39 соответственно. Данная группа элементов характеризуется схожими химическими и физическими свойствами и достаточно близкими значениями молекулярных масс, что предопределяет сложность их селективного извлечения. Одной из наиболее распространенных классификаций РЗЭ считается разделение их по конфигурации электронов на цериевую и иттриевую группы. Существует также классификация редкоземельных элементов по атомному весу на легкие и тяжелые (фиг. 1).

Для месторождений РЗЭ характерна комплексность, помимо непосредственно редкоземельных элементов в них содержатся Ta, Nb, P, Fe, Al и др. Основными минералами-концентраторами являются монацит, бастнезит, ксенотим, паризит, лопарит, эвдиалит и др., однако всего известно порядка 250 минералов, содержащих редкоземельные элементы.

Лопарит является минералом подкласса сложных оксидов, содержит такие элементы, как титан, тантал и ниобий, из группы редкоземельных элементов в нем представлены в основном элементы цериевой группы лантаноидов. Редкоземельные элементы подгруппы иттриевых и некоторое количество цериевых содержится в апатитовом сырье. Минерал эвдиалит (альмандинный шпат) характеризуется значительным содержанием редкоземельных элементов РЗЭ иттриевой группы.

Основными месторождениями редкоземельных элементов РЗЭ в России являются: Ловозеровское, Томторское, Умбозерское, Чингисуайское, Аллуйвайское, Белозиминское, Селигдарское и др., однако количество месторождений,

вовлеченных в эксплуатацию, значительно меньше. Извлечение редкоземельных элементов из комплексного сырья состоит преимущественно из основных этапов: обогащение, химическая переработка, разделение, рафинирование и очистка, которым предшествует непосредственно разведка месторождений и добыча сырья. В табл. 1 представлены основные действующие и проектируемые предприятия переработки месторождений РЗЭ. Структура редкоземельной промышленности РФ приведена на фиг. 2.

Разработка экологически безопасных технологий для извлечения редких и редкоземельных элементов из сырья различного генезиса предопределяет повышение экологичности на всех стадиях переработки:

- на стадии разведки и добычи сырья необходима оценка комплексности месторождения и последующее вовлечение в переработку отходов производства для снижения экологической нагрузки (например, фосфогипса или золошлаковых отходов) (Сучков, Литвинова, 2022; Литвинова, Олейник, 2021);

- на стадии рудоподготовительных процессов актуальным направлением является внедрение селективной дезинтеграции (Aleksandrova et al., 2018) с применением современного оборудования, например пресс-валков высокого давления, дробилок ударного действия, а также применение крупнокусковой рентгенометрической и фотометрической сепарации для получения отвальных хвостов с последующим их использованием в качестве складочного материала в руднике, обеспечивающих снижения энерго- и ресурсозатрат;

- на стадии обогащения сырья необходимо развитие и применение экологических методов, в том числе электрических, магнитных и гравитационных, применения на стадиях рудоподготовки, синтез новых реагентов для направленного регулирования поверхностных свойств минералов в процессах флотации и флотогравитации, а

Таблица 1. Основные месторождения редких и редкоземельных элементов

Месторождение  (запасы РЗМ в пересчете на оксиды, млн т)	Соержание РЗМ, %	Страна	Компания	Минералы РЗМ	Мощность по руде, тыс. т	Методы обогащения	Объем товарной продукции, тыс. т РЗМ в пересчете на оксиды	Соержание тяжелых РЗМ, %
Вауан Обо (36)	5.7–6.2	Китай	Inner Mongolia Baotou Steel Rare-earth Group	Бастнезит (73–76% оксидов РЗМ), Монацит (55–60% оксидов РЗМ)	5000	Магнитная сепарация, флотация (гравита- ция)	50–70	2–3
Xunwu/Lognan (1.5)	0.1–0.3	Китай	China Minmetals Rare Earth; Gan- zhou RE Group; Chinalco RE	Ионно-адсорбци- онные глины (10– 20% оксидов РЗМ)	до 50 000	Гидрометаллурги- ческие методы	20–45	до 90
Sichuan/Shandong (более 15.0)	6–10	Китай	Sichuan Jiangxi Copper Rare Earth, другие	Бастнезит (73–76% оксидов РЗМ)	до 1000	Гравитация, магнитная сепарация, флотация	10–40	2–3
Mountain Pass (0.2–2.0)	6–10	США	Molycorp	Бастнезит (73–76% оксидов РЗМ)	до 675	Флотация	19.5–40	1.2
Mount Weld (0.3–1.5)	6–23	Австралия	Lynas	Монацит (55–60% оксидов РЗМ)	270	Флотация	22	3–4
Dong Pao (0.4)	7–10	Вьетнам	Vinacjmin, Toyota, Sojitz	Бастнезит (73–76% оксидов РЗМ)	200 (до 720)	Магнитная сепарация, флотация	3 (до 7–10)	2–3
<u>Ловозерское (лопарит- товое сырье) (7.1)</u>	1.2	Россия	Ловозерский ГОК	Лопарит (30–35% оксидов РЗМ)	до 450	Гравитация, магнитная сепарация, флотация	2.7–6.5	1

Действующие предприятия

Таблица 1. Окончание

Месторождение (запасы РЗМ в пересчете на оксиды, млн т)	Соержание РЗМ, %	Страна	Компания	Минералы РЗМ	Мощность по руде, тыс. т	Методы обогащения	Объем товарной продукции, тыс. т РЗМ в пересчете на оксиды	Соержание тяжелых РЗМ, %
Nolans Bore (1.3)	3.1	Австралия	Alkane Resources	Монацит, алланит	1100	Гравитация, магнитная сепарация, флотация	20	3–4
Dubbo (0.7)	1	Австралия		Бастнезит, эвдиалит, фергуссонит	1000	Гидрометаллургические методы	6	23
Bear Lodge (1.45)	3.3	США	Rare Element Resources	Бастнезит	360	Гидрометаллургические методы	10.4	3–4
Кирава (0.1)	0.4–0.45	Канада	Matamec	Эвдиалит	1500	Магнитная сепарация	5	35
Норга Карг (0.3)	0.4–1.0	Швеция	Tasman Metals	Эвдиалит (2.5% оксидов РЗМ)	1500	Флотация, магнитная сепарация	6.8	50
Томторское (3.2)	10.59	Россия	Ростех	Монацит, ксенотим (55–60% оксидов РЗМ)	10 (200)	Гидрометаллургические методы	2.5 (10)	12
Кагунинское (0.67)	0.2–1.3	Россия		Гагаринит, иттро- флюорит	600 (3000)	Гравитация, магнитная сепарация, флотация	1.4 (5.7)	32
Чукотское (0.49)	7.3	Россия			150	Гидрометаллургические методы	3.1	5–6

ХОЛДИНГИ/ материнские компании	НЕДРОПОЛЬЗОВАТЕЛИ	МЕСТОРОЖДЕНИЯ в т.ч. подготавливаемые*	РУДНИКИ*	ФАБРИКИ обогажительные*	Перерабатывающие ПРЕДПРИЯТИЯ*
	ООО "Ловозерский ГОК" (участки Карнасурт и Кедыквырпахк)	Ловозерское	Карнасурт	Карнасурт	ОАО "Соликамский магнийевый завод" ГК "РОСАТОМ"
ПАО "ФОСАГРО"	АО "Апатит"	Апатитовый цирк, Плато Расвумчорр (подкарьерная часть)	Расвумчоррский	АНОФ-3	ПАО "ФосАгро" Череповец (опытно-промышленное производство)
		Юкспорское, Кукисвумчоррское	Кировский	АНОФ-2	
		Плато Расвумчорр (в контуре Центрального карьера), Ньюрпахкское, Кошвинское	Восточный		
ПАО "АКРОН"	АО "СЗФК"	Олений ручей	ГОК "Олений ручей" (карьер + подземный рудник)		ПАО "Акрон" Великий Новгород (промплощадка)
	ЗАО "Партомчоррское"	Партомчоррское			
ООО "ТРИАРК МАЙНИНГ"	ООО "Восток Инжиниринг"	Томторское месторождение (участок Буранный)	Карьер	Обогажительная фабрика	ООО "Краснокаменский гидрометаллургический комбинат"
ПАО ЧЕЛЯБИНСКИЙ ТРУБОПРОКАТНЫЙ ЗАВОД (ПАО "ЧТПЗ")	ЗАО "Техноинвест Альянс"	Зашихинское	Карьер	Обогажительная фабрика	Химико- металлургический завод в г. Краснокаменск
ГК "СКАЙГРАД"		Фосфогипс, Воскресенский район Московской области		Групповой концентрат РЗМ	АО "Воскресенские минеральные удобрения"  Лаборатория Инновационных Технологий (ЛИТ)

Фиг. 2. Структура редкоземельной промышленности РФ.

также применение различных энергетических методов воздействия (Чантурия и др., 2019а; Chanturiya, Bunin, 2022), таких как радиационные, ультразвуковые, электрохимические, СВЧ (Aleksandrova et al., 2020, 2023), плазменные, МЭМИ, что ввиду разработки промышленных электрохимических установок для кондиционирования пульпы, плазмотронов и линейных ускорителей предопределяет возможность внедрения принципиально новых экологически безопасных технологий на стадиях обогащения сырья (Чантурия, 2017);

○ на стадии химической переработки и сепарации элементов необходимо применение экологически безопасных экстракционных систем экстрагент–сорбент, что позволит повысить экологичность переработки за счет отсутствия токсичных и пожароопасных органических растворителей.

На стадии химической переработки сырья, содержащего РЗМ, существует два принципиальных способа разложения руд и концентратов: кислотный и щелочной способы, используемые для повышения концентрации РЗМ и удаления примесей. При кислотной обработке, как правило, используются неорганические кислоты, такие как серная, соляная и азотная. При щелочной обработке применяются едкий натр и кальцинированная сода.

В качестве реагентов экстрагентов наибольшее применение нашли:

- нейтральные фосфорорганические соединения (алкилфосфаты, среди которых наибольшее распространение получил трибутилфосфат), а также аналоги на основе смеси разветвленных спиртов с достаточно короткими радикалами;
- длиннорадикальные фосфорорганические кислоты;
- карбоновые кислоты и высшие изомерные кислоты;
- органические основания – третичные амины (ТОА-триоктиламин) и четвертичные аммониевые основания (ЧАО);
- для тяжелых элементов в качестве комплексона используется этилендиаминтетрауксусная кислота, а для легких – диэтилентриаминпентауксусная и нитрилтриуксусная кислоты.

Одним из широко применяемых методов в технологии близких по свойствам РМ является экстракционный. Несмотря на изученность метода, проводятся широкие исследования в России и за рубежом по оптимизации экстракционных процессов для конкретных схем и их комбинированию с другими методами. Подобное применение нашли также методы сорбции, особенно эффективные при малых концентрациях РМ, а также

**Таблица 2.** Запасы РЗМ и объемы их товарной добычи в мире

Страна	Запасы, категория	Запасы, млн. тонн $\Sigma TR_2O_3$	Доля в мировых запасах, %	Товарная добыча в 2022 г., тыс. тонн $\Sigma TR_2O_3$	Доля в мировой добыче, %
Китай	<i>Reserves</i>	44.0 <sup>1</sup>	35.5	140.0 <sup>1*</sup>	58.4
США	<i>Reserves</i>	1.4 <sup>1</sup>	1.1	38 <sup>1</sup>	15.8
Мьянма	—	н/д	н/д	30 <sup>1</sup>	12.5
Австралия	<i>Reserves</i>	4.1 <sup>1</sup>	3.3	14 <sup>2</sup>	5.8
Мадагаскар	<i>Reserves</i>	н/д	н/д	8 <sup>1</sup>	3.3
Индия	<i>Reserves</i>	6.9 <sup>1</sup>	5.6	3 <sup>1</sup>	1.3
Россия	Запасы категорий А + В + С <sub>1</sub> **	19.3 <sup>3</sup>	15.6	2.7 <sup>3</sup>	1.1
Прочие	<i>Reserves</i>	48.3 <sup>1</sup>	39.0	4	1.7
Мир	<i>Reserves</i>	124.0	100.0	239.7	100.0

\* Производственная квота.

\*\* Разрабатываемых и подготавливаемых к разработке месторождений 1 – U.S. Geological Survey, 2 – Lynas Rare Earths Ltd., 3 – ГБЗ РФ.

комплексные методы, сочетающие обогащительные, кристаллизационные (осадительные), экстракционные и сорбционные:

- целенаправленный дизайн молекул экстрагентов, позволяющий многократно повысить селективность выделения соединений редких металлов (РЗЭ, радионуклиды и др.), а также устойчивость экстрагентов в технологическом процессе (Цивадзе, 2020; Сафиулина и др., 2020; Иванова и др., 2019);

- бинарная экстракция смесью катионо- и анионообменного экстрагентов из растворов для разделения близких по свойствам металлов, например, цветных, Ti, Nb и Ta (Белова и др., 2010);

- вытеснение примесных элементов из экстрактов на стадии промывки и реэкстракции при получении чистых и высокочистых соединений РЗЭ, Nb, Ta и др. (Мудрук и др., 2019; Николаев, Майоров, 2007; Кириченко и др., 2013);

- метод сорбционного выделения РЗМ непосредственно из минеральных концентратов и твердых продуктов переработки апатита, эвдиалита и др. сырья в среде разбавленных минеральных кислот;

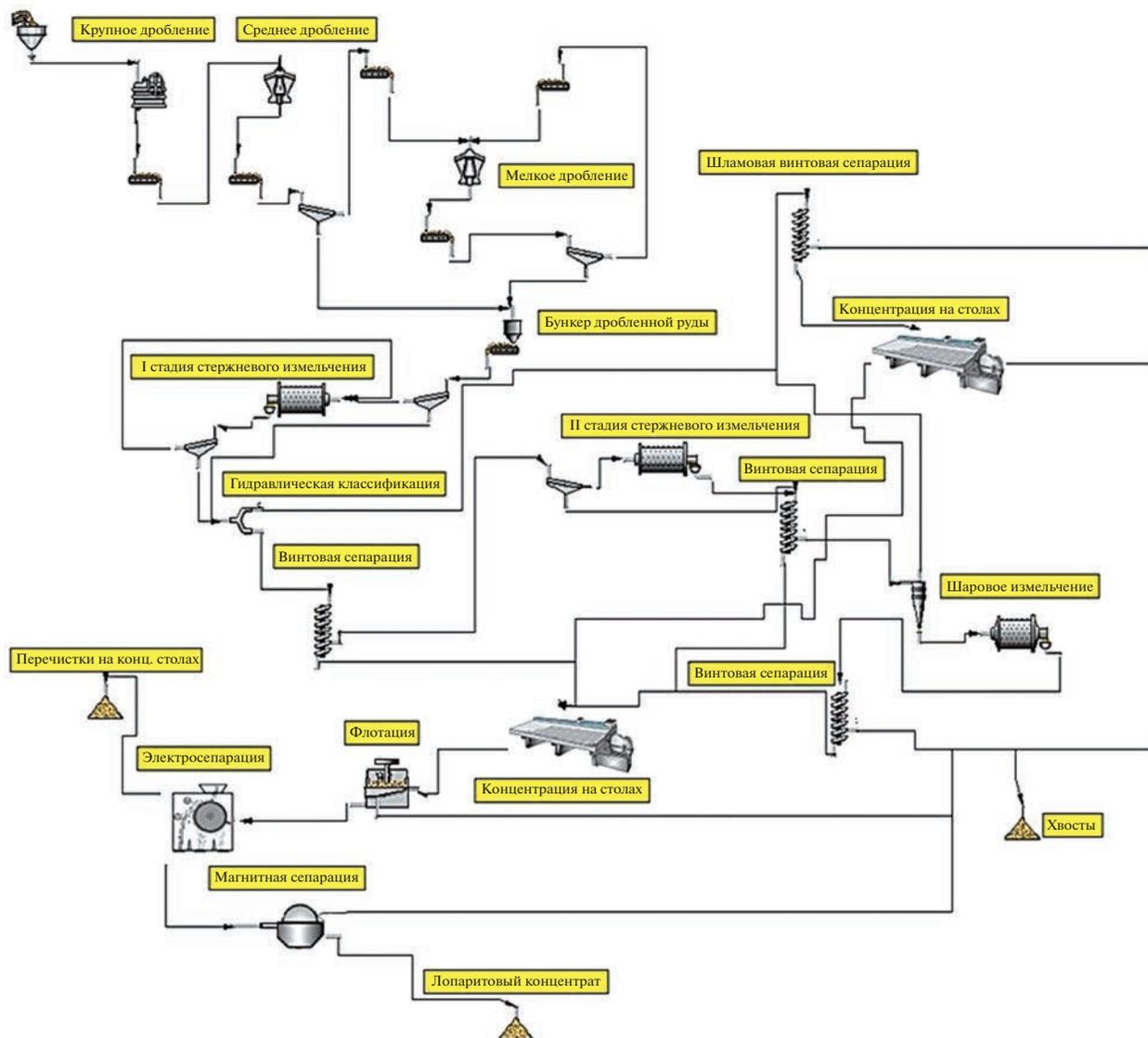
- сочетание обогащительных методов и химической очистки для повышения выхода и качества выделяемых соединений редких металлов, на примере выделения бадделеита (Лебедев и др., 2007);

- повышение эффективности разделения титана, ниобия и тантала из сернокислых растворов на стадии кристаллизации их аммонийных или безаммонийных сульфатных солей и азотнокислое разложение перовскитового концентрата в присутствии фторсодержащих реагентов (Герасимова и др., 2017).

### ИННОВАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ИЗВЛЕЧЕНИЯ РЕДКИХ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ КОМПЛЕКСНЫХ РУД СЛОЖНОГО ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА

Россия обладает обширной сырьевой базой и месторождениями редких и редкоземельных металлов, которые в том числе относятся к стратегическим, однако переработка и добыча редкоземельного сырья ограничена. Крупнейшим разрабатываемым месторождением с получением редкоземельных концентратов является Ловозерское, располагающееся в Мурманской области, содержащее при этом преимущественно цериевую группу (лантаноиды). Перспективные для вовлечения в переработку месторождения РЗМ в России остаются на стадии проектов по причине отсутствия промышленных предприятий по переработке руд и продуктов обогащения, а также ввиду высокой конкуренции со стороны Китая. В табл. 2 представлена сводная информация по запасам РЗМ и объемам товарной продукции в мире.

Главной сложностью при переработке редкоземельного сырья является невозможность получения отдельных концентратов для каждого элемента ввиду сильной близости их технологических свойств и невозможности селективной экстракции. За 2020 для РФ отмечено увеличение добычи РЗМ по сравнению с предыдущим годом на 2.87%, что составляет 114.8 тыс. т  $\Sigma TR_2O_3$ , значительная доля которых приходится на апатит-нефелиновые руды. Для лопаритового концентрата (получаемого только в России) отмечается снижение по уровню добычи на 7.8% до 8.8 тыс. т (Петров и др., 2021).



Фиг. 3. Обогащенный перелопаритовых руд на Ловозерском ГОКе.

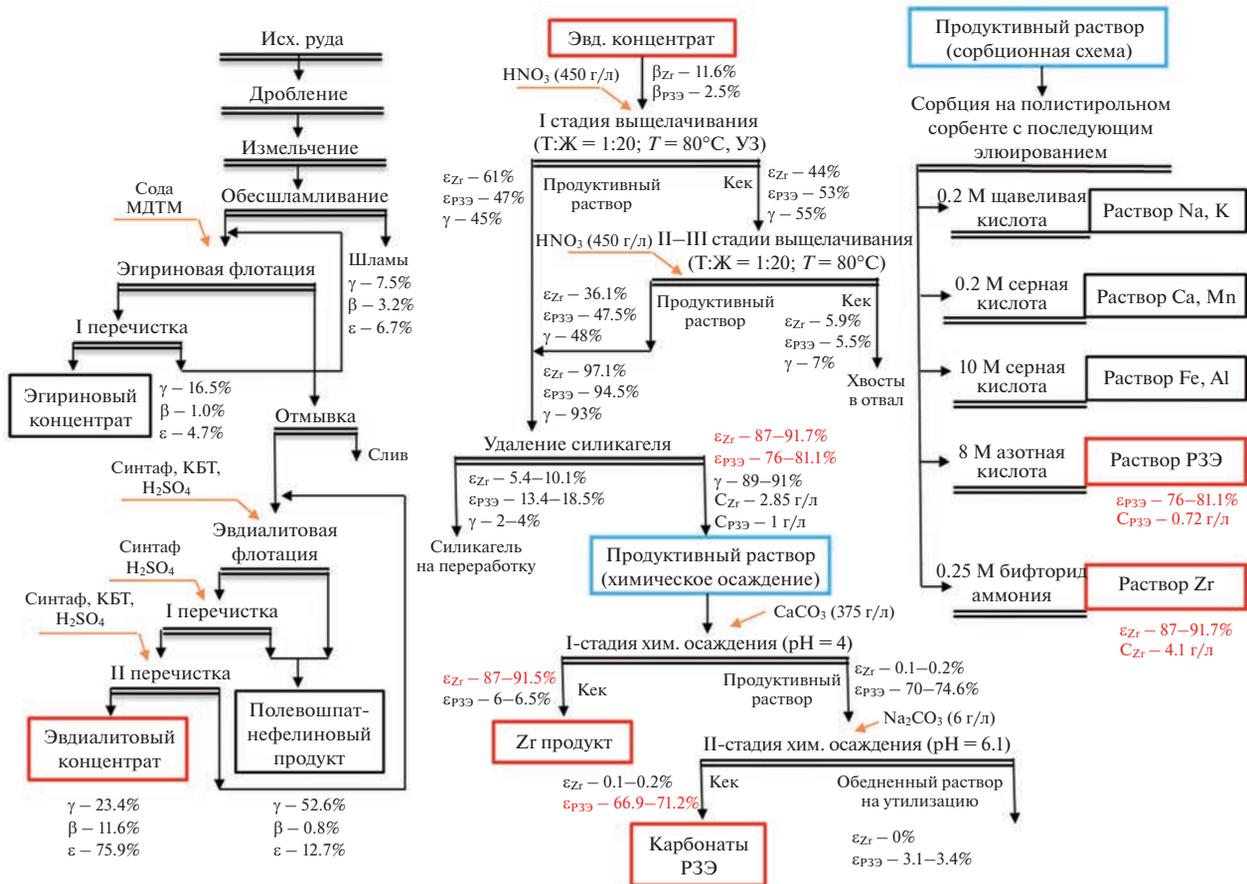
Концентраты, содержащие РЗМ, направляются на ОАО «Соликамский магниевый завод» ГК РОСАТОМ (г. Соликамск, Пермского края), основной продукцией которого являются титановая губка, оксиды и карбонаты РЗМ, а также оксиды Ta и Nb. К крупнейшим по запасам месторождениям России относятся Ловозерское, Томторское, Белозиминское, Чуктуконское и др. Возмозможность технологически эффективной и экономически целесообразной переработки руд Ловозерского месторождения с получением сверхчистого циркония и оксидов РЗЭ была обоснована в 1990 г. (Крюков и др., 2012; Чантурия, 2022).

Проблемам переработки руд Ловозерского месторождения посвящены работы (Чантурия и др., 2019б; Chanturia et al., 2017), направленные на переработку эвдиалитового концентрата, в том чис-

ле с применением энергетических воздействий. Принципиальная схема обогащения Ловозерских руд представлена развитой гравитационной схемой, основные операции которой реализованы с применением винтовых сепараторов, а перечистные операции с применением концентрационных методов обогащения применяются для доводки черного концентрата (фиг. 3).

Кроме лопаритового концентрата, из руды Ловозерского месторождения можно получать эвдиалитовый концентрат. В ИПКОН РАН разработана технология получения эвдиалитового концентрата и его последующей селекции на основе комбинированных процессов (фиг. 4).

Томторское месторождение является одним из крупнейших в мире по запасам минералов-кон-



Фиг. 4. Принципиальная схема получения эвдиалитового концентрата и его селекции.

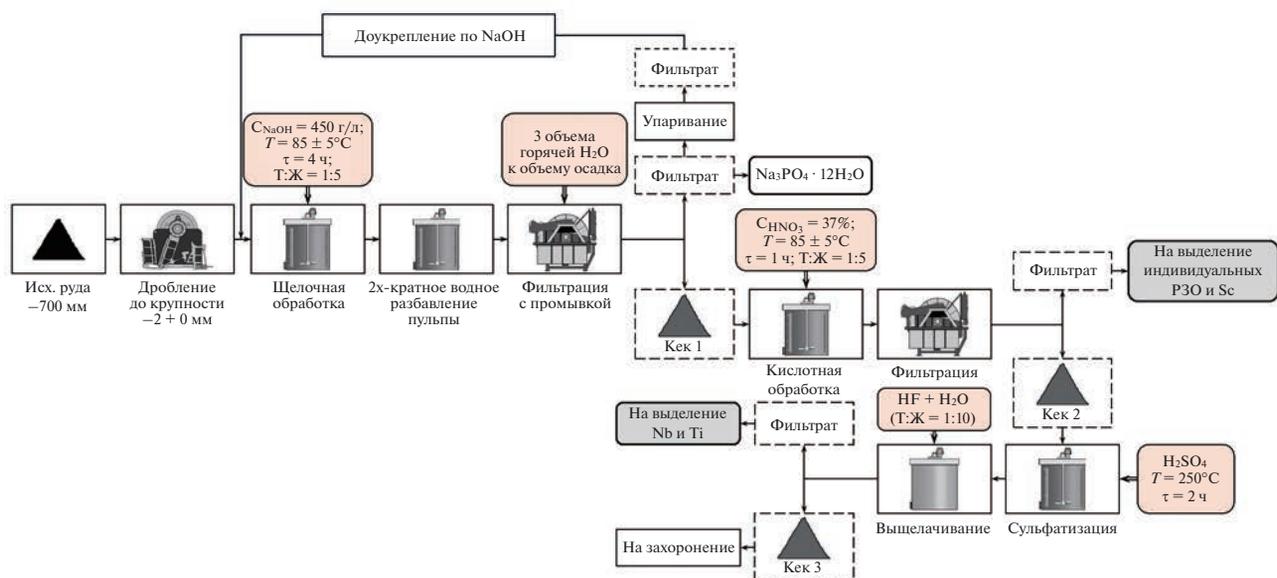
центраторов редких и редкоземельных металлов, в том числе монацита, пирохлора, ксенотипа и др., а также источников таких элементов, как Nb, Y, Sc, La, Ce, Eu, Ti, Nd и Sm. Томторское месторождение является перспективным источником редких и редкоземельных металлов, в связи с чем возможная реализация комплексного проекта “Томтор–Краснокаменский комбинат” может обеспечить отечественные потребности в стратегических металлах. Конечным продуктом обогащения при этом будут являться пентаоксид ниобия и концентрат, представляющий собой карбонаты редкоземельных элементов, при дальнейшей переработке которых возможно получение ферро-ниобия и оксидов Ce и La, оксида NdPr, а также смешанного концентрата карбонатов средних и тяжелых РЗЭ (Пресс-релиз от 19 апреля 2021 г., Полиметалл).

По величине запасов Томторское месторождение сопоставимо с такими месторождениями, как Виттватерсранд в ЮАР, Сухой Лог, Норильская группа месторождений в России, по запасам РЗЭ опережая такие месторождения, как Маунтин-Пасс в США и Баюнь-Обо в Китае.

Особенности минералогического и элементного состава руд Томторского месторождения определяют необходимость применения гидрометаллургических технологий для их комплексной переработки (фиг. 5) (Ануфриева, Лихникевич, 2018; Ануфриева и др., 2011; Петрова и др., 1986). Возможным технологическим способом переработки данного типа сырья является ликвационная плавка концентратов с использованием добавок в окислительной среде (Делицын и др., 1987, 2015).

В работах (Елютин и др., 1995; Косынкин и др., 2105; Кузьмин и др., 2006) приведена технология автоклавно-щелочного вскрытия продуктов. После вскрытия проводится кислотное выщелачивание полученного кека с переходом в раствор РЗЭ, тогда как ниобий не переходит в жидкую фазу.

В работе (Кузьмин и др., 2006) показана возможность солянокислого вскрытия кека после автоклавного выщелачивания, при этом в жидкую фазу переходят РЗЭ, в том числе итрий и скандий, с получением кека (концентрата), содержащего оксиды ниобия и фосфора. Данная технология дает возможность получения пентаоксида ниобия, оксида скандия, индивидуальных оксидов РЗЭ группы церия и коллективного кон-



Фиг. 5. Принципиальная технологическая схема переработки пироклор-монацит-крандаллитовых руд Томторского месторождения.

центрата карбонатов РЗЭ среднетяжелой группы как товарных продуктов.

С применением гидрометаллургических технологий также предполагается переработка руд Чуктуконского месторождения, включающая последовательное агитационное и автоклавное выщелачивание руды для перевода в жидкую фазу марганца и РЗЭ. Полученный раствор проходит стадию гидролитической очистки от железа и прочих примесей, последующее упаривание с получением диоксида марганца за счет кристаллогидратов нитрата марганца и кальция, а также экстракцию индивидуальных РЗЭ. Товарная продукция в этом случае представлена индивидуальными оксидами РЗЭ, химически чистым оксидом марганца, оксидами скандия и железа.

Трудновскрываемое редкометальное сырье также возможно перерабатывать с применением термохимического метода вскрытия за счет спекания с гидроксидами и карбонатами щелочных и щелочноземельных металлов, что обеспечивает практически полное разложение сырья. Последующее кислотное выщелачивание позволяет удалить примеси, в том числе радионуклиды.

Термохимическое спекание с использованием карбоната кальция применяется при переработке бадделейт-циркониевого концентрата руд Алгаминского месторождения, и обеспечивает полное разложение сырья.

АО «Аркминерал-Ресурс» на базе Африкандского месторождения перовскит-титаномагнетитовых руд (Мурманская область) реализует проект по получению и переработке перовскитового концентрата. Планируемая продукция — пиг-

ментный диоксид титана, концентраты РЗМ, пентаоксиды ниобия и тантала, титаномагнетитовый концентрат. При производительности ~1 млн т/год руды будет получен перовскитовый концентрат — 190 тыс. т/год, основными продуктами переработки которого являются (тыс. т/год): пигментный  $TiO_2$  90, карбонаты РЗМ (в пересчете на  $Ln_2O_3$  — 2.25,  $Nb_2O_5$  — 0.9,  $Ta_2O_5$  — 0.027).

Ввод месторождения в эксплуатацию экономически целесообразен. Индекс прибыльности более двух. На фиг. 6 приведена схема обогащения руд Африкандского месторождения с последующей азотнокислой переработкой перовскитового концентрата, позволяющая снизить экологическую нагрузку за счет извлечения тория.

Перспективным направлением является поиск и разработка технологий для вовлечения в переработку нетрадиционного сырья, представляющего собой источник ценных компонентов, например техногенное сырье, фосфогипс, растворы экстракционной фосфорной кислоты, диктионемовые сланцы и др. (Сизяков и др., 2016; Черемисина и др., 2019). Диктионемовые сланцы представляют собой источник редких и редкоземельных металлов, таких как рений и платиноиды (Александрова и др., 2015). В работах (Александрова и др., 2016, 2017, 2019) приведена технологическая схема для извлечения рения и платиноидов из диктионемовых сланцев на основе применения комбинации хелатообразующих реагентов и воздействия физическими методами.

В работах (Xiong et al., 2012a, 2012b) предложены реагенты, используемые в качестве экстрагентов и сорбентов, на основе фосфорилподандов, ко-



химических веществ и высокая экологичность процесса.

Метод нанофильтрации РЗЭ (Kurniawan, Chan, 2006) применяется для осуществления селективной сепарации частиц от жидкой фазы за счет возникновения на стадии фильтрации, помимо диффузионного и конвективного механизмов, электростатических сил, ввиду наличия функциональных групп, что повышает эффективность фильтрации. Данная технология извлечения РЗЭ характеризуется высокой эффективностью, экологичностью, однако ее недостатком являются высокие экономические затраты.

Актуальным направлением исследований, нацеленных на повышение экологичности технологий извлечения РЗЭ, является метод биосорбции из разбавленных растворов. Ряд работ посвящен успешному применению биомассы *Sargassum* для экстракции Eu, Sm, Pr, Yb (Schiewer, 1996; Yang, 2000; Das, Devlina, 2013).

В работе (Zakhodyaeva et al., 2019) представлена экологически безопасная технология “зеленой” экстракции редкоземельных элементов из нитратных растворов.

Отходы электронной промышленности, отработанные источники тока представляют собой нетрадиционное сырье редких и редкоземельных элементов (Вошкин и др., 2023). Это делает актуальной разработку технологий замкнутого цикла с получением кондиционной продукции РМ, сочетающих принципы “зеленой” химии с гидрометаллургическими процессами переработки, что приводит к снижению экологической нагрузки за счет вовлечения в переработку отходов (Xu, 2021).

В работе (Gradov et al., 2019) предложено целенаправленное применение ультразвукового воздействия для интенсификации экстракционных технологий с применением экологичных экстрагентов.

Угольные отходы и золошлаки являются перспективными нетрадиционными источниками РЗЭ. В качестве экстрагента для извлечения редкоземельных металлов из данного типа сырья используется лимонная кислота. Экстракции способствует использование сверхкритического диоксида углерода в качестве растворителя. Лимонная кислота — это экологически чистый способ удерживать редкоземельные металлы в растворе.

Фосфогипс представляет собой побочный продукт переработки фосфатного рудного сырья кислотным методом. Преимуществом данного сырья как источника редкоземельных элементов является практически полное отсутствие в нем радиоактивного тория. Фосфогипс содержит 0.3–0.6% РЗЭ (на оксиды), примеси фторид- и фосфат-ионов, а также катионов железа, алюминия и титана. По предложенной в работе схеме

степень извлечения РЗЭ в раствор составляет  $95 \pm 3\%$ . При этом редкоземельные элементы находятся в форме карбонатных комплексов и могут быть отделены с применением экстрагентов. Разработанная схема позволяет повысить экологичность переработки фосфатного сырья за счет вовлечения в переработку отходов производства и получения новых концентратов редкоземельных элементов (Литвинова, Олейник, 2021).

В работе (Луцкий и др., 2013) показан способ извлечения церия и европия из нитратных сред с применением нафтенной кислоты. Рассмотрены возможности экстракции лантана, церия и самария олеиновой кислотой в инертном разбавителе. При этом установлено, что экстракционная способность снижается в ряду  $Eu \rightarrow Sm \rightarrow Nd \rightarrow Ce \rightarrow Yb \rightarrow Er \rightarrow Y \rightarrow Ho \rightarrow La$ . В представленной технологии показана возможность экстракционного разделения РЗЭ по линии празеодим — церий с применением трибутилфосфата с получением лантан-цериевого концентрата.

Таким образом, в настоящее время в России активно разрабатываются инновационные экологически безопасные процессы извлечения редких и редкоземельных металлов из комплексных руд сложного вещественного состава (Захаров, 2015; Кременецкий, Калиш, 2014) и техногенных продуктов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Россия обладает мощной сырьевой базой, потенциально пригодной для производства требуемого объема редкометаллической продукции. Однако значительная часть сырья относится к нетрадиционным видам, представленным комплексными рудами сложного состава с низким содержанием РМ. Схемы переработки многих видов такого сырья с получением продукции РМ отработаны, ряд технологий соответствует требованиям к инновационным экологически безопасным процессам. Трудности реализации разработанных технологий связаны, в основном, со сложным вещественным составом сырья, низким содержанием ценных компонентов, сложными горно-геологическими условиями залегания ряда месторождений, а в отдельных случаях отсутствием необходимой инфраструктуры, что обуславливает высокую стоимость готовой продукции и, как следствие, ее неконкурентоспособность на мировом рынке. Поэтому практическое использование сырья РМ отечественной промышленностью в настоящее время находится на низком уровне.

Частный сектор без поддержки государства и научного сообщества не способен кардинально изменить ситуацию с обеспечением страны РМ продукцией и готовыми изделиями, содержащими РМ. Актуальным решением данной проблемы

представляется создание единой дорожной карты “Редкие металлы России”. При разработке технологий добычи, обогащения и переработки сырья с получением необходимого качества концентратов необходимо обосновывать также экономическую эффективность и целесообразность применения технологий, а также проводить оценку их экологической безопасности. Широкий выбор сырья, учет климатических условий расположения месторождений и производств по переработке сырья, наличия требуемой инфраструктуры в сочетании с экономическими и экологическими показателями позволят выбрать наилучшие варианты для производства РМ и продукции на их основе, обеспечить полное импортозамещение стратегических материалов РМ, необходимых для сохранения высокой обороноспособности страны и ускорения ее экономического развития. Для достижения технологического суверенитета России необходимо обеспечение государственными заказами горно-металлургических компаний, производящих РМ и РЗ продукцию.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александрова Т.Н., Ромашев А.О., Янсон У.М.* Исследование возможности извлечения редких элементов из черносланцевых пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 4. С. 124–128.
- Александрова Т.Н., Николаева Н.В., Ромашев А.О., Янсон У.М.* Патент РФ № 2576715 «Способ повышения извлечения платиноидов из нетрадиционного платиноносителя», опублик. 10.03.2016., бюл. № 7.
- Александрова Т.Н., Ромашев А.О., Павлова У.М.* Патент РФ № 6121622 «Способ флотационного извлечения редких металлов», опублик. 02.03.2017., бюл. № 7.
- Александрова Т.Н., Кусков В.Б., Корчевенков С.А.* Патент РФ № 2685608 «Способ переработки техногенного углеродсодержащего сырья», опублик. 22.04.2019, бюл. № 12.
- Ануфриева С.И., Броницкая Е.С., Литвинцев Э.Г., Ожогина Е.Г., Петрова Н.В., Рогожин А.А., Соколова В.Н.* Опыт и перспективы применения современных технологий переработки бедных трудно-обогатимых руд // Разведка и охрана недр. 2011. № 5. С. 70–74.
- Ануфриева С.И., Лихникевич Е.Г.* Технологические проблемы комплексной переработки руд Томторского рудного поля // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9. № 2–1. С. 115–117.
- Белова В.В., Вошкин А.А., Егорова Н.С., Холькин А.И.* Экстракция редкоземельных металлов из нитратных растворов бинарным экстрагентом на основе Суапех 272 // Журнал неорганической химии. 2010. Т. 55. № 4. С. 679–683.
- Бортников Н.С., Гореликова Н.В., Коростелев П.Г.* Поведение редкоземельных элементов в оловоносных гидротермально-магматических системах (на примере месторождений Дальнего Востока) // Докл. РАН. 2007. Т. 415. № 6. С. 788–792.
- Бортников Н.С., Гореликова Н.В., Коростелев П.Г., Гоневчук В.Г.* Редкоземельные элементы в турмалине и хлорите оловоносных ассоциаций: факторы, контролируемые фракционирование РЗЭ в гидротермальных системах // Геология рудн. месторождений. 2008. Т. 50. № 6. С. 507–525.
- Бортников Н.С., Волков А.В., Галямов А.Л., Викентьев И.В., Лаломов А.В., Мурашов К. Ю.* Фундаментальные проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологической промышленности и энергетики России // Геология рудн. месторождений. 2022. Т. 64. № 6. С. 617–633.
- Вошкин А.А., Заходяева Ю.А., Зиновьева И.В., Кожневникова А.В., Милевский Н.А., Токарь Е.С.* Экстракционные технологии рециклинга отработанных источников тока / Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14. № 1. С. 36–39. <https://doi.org/10.37614/2949-1215.2023.14.1.006>
- Герасимова Л.Г., Николаев А.И., Петров В.Б., Бычяна Ю.Г.* Азотнокислотное разложение перовскита в присутствии фторсодержащего реагента // Цветные металлы. 2017. № 5. С. 50–53.
- Горячев Н.А., Викентьева О.В., Бортников Н.С., Прокофьев В.Ю.* Наталкинское золоторудное месторождение мирового класса: распределение РЗЭ, флюидные включения, стабильные изотопы кислорода и условия формирования руд (Северо-Восток России) // Геология рудн. месторождений. 2008. Т. 50. № 5. С. 414–444.
- Делицын Л.М., Мелентьев Г.Б., Лебедева Г.Г.* Перспективы пирохимической переработки фосфатно-редкометалльного сырья // Редкие элементы в нетрадиционном сырье и перспективы их попутного производства. М.: ИМГРЭ, 1987. С. 18–31.
- Делицын Л.М., Мелентьев Г.Б., Толстов А.В., Магазина Л.А., Самонов А.Е., Сударева С.В.* Технологические проблемы Томтора и их решение // Редкие земли. 2015. № 2(5). С. 164–179.
- Елютин А.В., Чистов Л.Б., Муленко В.Н.* Комбинированная технология получения товарных продуктов из ультрабогатых редкометалльных руд Томторского месторождения // Редкоземельные металлы: переработка сырья, производство соединений и материалов на их основе: тез. докл. междунар. конф. Красноярск, 11–15 сентября 1995г. Красноярск: Ин-т химии и хим.-металлург. процессов СО РАН, 1995. С. 74–77.
- Захаров В.Н.* Техногенные образования минерально-сырьевого комплекса России: требования к эффективному использованию и возможности снижения технологических рисков, 2015. 20 с. <http://rosgorprom.com/files>
- Иванова И.С., Криворотько Е.С., Илохин А.Б., Демин С.В., Пятова Е.Н., Баулин В.Е., Цивадзе А.Ю.* Экстракция редкоземельных элементов в системе 1, 1, 7-тригидродека-фторгептанол – вода фосфорилпододами, производными дифосфоновых кислот // Журнал неорганической химии. 2019. Т. 64. № 5. С. 538–544.
- Кириченко Н.В., Николаев А.И., Майоров В.Г., Тюремов А.В., Ильин Е.Г.* Экстракция сурьмы и тантала из фторидных водных растворов н-октанолом и трибутилфосфатом // Журнал неорганической химии. 2013. Т. 58. № 4. С. 541–541.
- Косынкин Ю.М., Трубаков Г.А., Сарычев В.Д.* Прошлое и будущее редкоземельного производства в России // Евразийское научное обозрение. 2015. № 6. С. 49–60.

- Кременецкий А.А., Калиш Е.А.* Комплексные редкометалльные месторождения России и основные направления повышения их инвестиционной привлекательности // Разведка и охрана недр. 2014. № 9. С. 3–11.
- Крюков В.А., Толстов А.В., Самсонов Н.Ю.* Стратегическое значение редкоземельных металлов в мире и в России // Всероссийский экономический журнал. 2012. № 2 (11). С. 5–16.  
<https://doi.org/10.30680/ЕСО0131-7652-2012-11-5-16>
- Кузьмин В.И., Ломаев В.Г., Пашков Г.Л., Овчинников С.В., Кузьмина В.Н., Дорохова Л.И.* / Переработка руд месторождений кор выветривания карбонатитов – будущее редкометалльной промышленности России // Цв. металлы. 2006. № 12. С. 62–68.
- Лебедев В.Н., Локишин Э.П., Бармин И.С.* Выделение бадделита из магнетит-сульфидных отвальных хвостов // Обогащение руд. 2007. № 5. С. 19–22.
- Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В., Яковенко А.В., Наумов И.А., Ратников М.А.* Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 95–111.  
<https://doi.org/10.31897/PMI.2022.100>
- Литвинова Т.Е., Олейник И.Л.* Кинетика растворения фосфатов редкоземельных металлов растворами карбонатов щелочных металлов // Записки Горного института. 2021. Т. 251. С. 712–722.  
<https://doi.org/10.31897/PMI.2021.5.10>
- Луцкий Д.С., Литвинова Т.Е., Чиркст Д.Э., Луцкая В.А., Жуков С.В.* Термодинамическое описание экстракции церия и европия нафтенной кислотой при стехиометрическом расходе экстрагента // Записки Горного института. 2013. Т. 202. С. 97–101.
- Мудрук Н.В., Николаев А.И., Сафонова Л.А., Дрогобужская С.В.* Экстракция редкоземельных элементов из нитратных растворов после вскрытия перовскитового концентрата // Труды Кольского научного центра РАН. 2019. Т. 10. № 1 (3). С. 207–214.
- Николаев А.И., Майоров В.Г.* Новые подходы в технологии экстракции ниобия и тантала // Докл. РАН. 2007. Т. 415. № 1. С. 67–69.
- Петров Е.И., Тетенькин Д.Д. и др.* О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году: Государственный доклад. Доступно онлайн: [https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyye\\_doklady/gosudarstvennyy\\_doklad\\_o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_2020/](https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_2020/) (дата обращения: 02.05.2023).
- Петрова Н.В.* Влияние особенностей структуры и состава тантало-ниобатов на их поведение в технологических процессах / Н.В. Петрова [и др.] // Современные химико-металлургические методы: сб. науч. тр. М.: ВИМС, 1986. С. 65–71.
- Пресс-релиз, режим доступа: <https://www.polymetalinternational.com/ru/investors-and-media/news/press-releases/19-04-2021/> (дата обращения 02.05.2023)
- Распоряжение от 22 декабря 2018 года №2914-р. Об утверждении Стратегии развития минерально-сырьевой базы России до 2035 года. 2018. URL: <http://government.ru/docs/35247/> (дата обращения 02.04.2023)
- Распоряжение Правительства РФ от 30 августа 2022 г. № 2473-р. Об утверждении перечня основных видов стратегического минерального сырья. 2022. <http://actual.pravo.gov.ru/text.html#pnun=0001202208310002> (дата обращения 02.04.2023)
- Сафиулина А.М., Зверев Д.В., Макарова Т.В., Борисова Н.Е., Лопатин Д.А., Баулин В.Е., Цивадзе А.Ю.* и др. Экстракционные свойства 2, 2'-тиобис (N, N-диоктилцетамид) для выделения благородных металлов из растворов переработки ОЯТ // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2020. № 2. С. 53–579.
- Сучков Д.В., Литвинова Т.Е.* Фосфогипс как техногенное сырье для получения товарных продуктов с заданными свойствами // Современные тенденции развития химической технологии, промышленной экологии и экологической безопасности. 2022. С. 69–72.
- Цивадзе А.Ю.* Селективное разделение близких по свойствам химических элементов периодической таблицы – основа новых технологий // Вестник РАН. 2020. Т. 90. № 4. С. 320–330.
- Чантурия В.А.* Научное обоснование и разработка инновационных процессов комплексной переработки минерального сырья // Горный журнал. 2017. № 11. С. 7–13.  
<https://doi.org/10.17580/gzh.2017.11.01>
- Чантурия В.А., Бунин И.Ж., Рязанцева М.В., Чантурия Е.Л., Самусев А.Л., Анашкина Н.Е.* О механизме изменения структурно-химических и технологических свойств эвдиалита при комбинированных энергетических воздействиях // Изв. РАН. Серия физическая. 2019а. Т. 83. № 6. С. 789–793.
- Чантурия В.А., Чантурия Е.Л., Миненко В.Г., Самусев А.Л.* Интенсификация процесса кислотного выщелачивания эвдиалитового концентрата на основе использования энергетических воздействий // Обогащение руд. 2019б. № 3. С. 29.
- Чантурия В.А.* Научное обоснование и разработка инновационных процессов извлечения циркония и РЗЭ при глубокой и комплексной переработке эвдиалитового концентрата. Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 505–516.  
<https://doi.org/10.31897/PMI.2022.31>
- Aleksandrova T.N., Nikolaeva N.V., Lieberwirth H., Aleksandrov A.V.* Selective desintegration and concentration: Theory and practice // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2018. V. 56. № 03001.
- Aleksandrova T.N., Nikolaeva N.V., Afanasova A.V., Romashev A.O., Aburova V.A., Prokhorova E.O.* Extraction of Low-Dimensional Structures of Noble and Rare Metals from Carbonaceous Ores Using Low-Temperature and Energy Impacts at Succeeding Stages of Raw Material Transformation // Minerals. 2023. V. 13. № 1. С. 84.
- Aleksandrova T.N., Afanasova A.V., Aleksandrov A.V.* Microwave treatment to reduce refractoriness of carbonic concentrates // J. of Mining Science. 2020. V. 56. P. 136–141.
- Chanturia V.A., Minenko V.G., Samusev A.L., Chanturia E.L., Koporulina E.V.* The mechanism of influence exerted by integrated energy impacts on intensified leaching of zirconium and rare earth elements from eudialyte concentrate // J. of Mining Science. 2017. V. 53. № 5. P. 890–896.  
<https://doi.org/10.1134/S1062739117052921>

- Chanturiya V.A., Bunin I.Z.* Advances in Pulsed Power Mineral Processing Technologies // Minerals. 2022. V. 12. № 9. P. 1177.
- Das N., Devlina D.* Recovery of rare earth metals through biosorption: an overview // J. of Rare Earths. 2013. V. 31. № 10. P. 933–943.
- Gradov O.M., Zakhodyaeva Y.A., Zinov'eva I.V., Voshkin A.A.* Some features of the ultrasonic liquid extraction of metal ions // Molecules. 2019. V. 24. № 19. P. 3549.
- Gueroult R, Rax J-M, Fisch NJ.* Opportunities for plasma separation techniques in rare earth elements recycling // J. Clean Prod. 2018. 182:1060–9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.066>
- Kurniawan T, Chan G.* Physico-chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals // Chem. Eng. J. 2006. 118. P. 83–98.
- Litvinenko V.S., Sergeev I.B.* Innovations as a factor in the development of the natural Resources sector // Studies on Russian Economic Development. 2019. V. 30. № 6. P. 637–645. <https://doi.org/10.1134/S107570071906011X>
- Opore E.O., Struhs E., Mirkouei A.* A comparative state-of-technology review and future directions for rare earth element separation // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. V. 143. № 110917.
- Schiewer S., Volesky B.* Modeling multi-metal ion exchange in biosorption // Environmental science & technology. 1996. V. 30. № 10. P. 2921–2927.
- Suli L. M., Ibrahim W. H. W., Aziz B. A., Deraman M. R., Ismail N. A.* A review of rare earth mineral processing technology // Chemical Engineering Research Bulletin. 2017. P. 20–35.
- Vieira R.H., Volesky B.* Biosorption: a solution to pollution? // International microbiology. 2000. V. 3. № 1. P. 17–24.
- Xiong C., Chen X., Liu X.* Synthesis, characterization and application of ethylenediamine functionalized chelating resin for copper preconcentration in tea samples // Chemical engineering journal. 2012a. V. 203. P. 115–122.
- Xiong C., Chen X., Yao C.* Preparation of a novel heterocycle-containing polystyrene chelating resin and its application for Hg (II) adsorption in aqueous solutions // Current Organic Chemistry. 2012b. V. 16. № 16. P. 1942–1948.
- Xu G.* Fundamental understanding of mineral dissolution and rare earths speciation in supercritical CO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O–Chelator (s) systems for extraction and separation from coal and coal byproducts. Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2021. № SAND2021-0583D.
- Yang J.* Biosorption of Uranium and Cadmium on Sargassum Seaweed Biomass (PhD Thesis) // McGill University, Montreal, Canada, 2000. pp. 116.
- Zakhodyaeva Y.A., Rudakov D.G., Solov'ev V.O., Voshkin A.A., Timoshenko A. V.* Liquid-liquid equilibrium of aqueous two-phase system composed of poly(ethylene oxide) 1500 and sodium nitrate // J. of Chemical and Engineering Data. 2019. V. 64. № 3. P. 1250–1255.

УДК 338.22.021.4

## ВЗАИМОСВЯЗЬ “РЗМ–ЭНЕРГОПЕРЕХОД” В КОНТЕКСТЕ ПРОЕКТОВ ПОЛНОГО ЦИКЛА

© 2023 г. В. А. Крюков<sup>а</sup>, \*, В. А. Яценко<sup>а</sup>, \*\*, Я. В. Крюков<sup>а</sup>, \*\*\*

<sup>а</sup>Институт экономики и организации промышленного производства СО РАН,  
проспект Академика Лаврентьева, 17, Новосибирск, 630090 Россия

\*E-mail: kryukov@ieie.nsc.ru

\*\*E-mail: yva@ieie.nsc.ru

\*\*\*E-mail: kryukovyv@ieie.nsc.ru

Поступила в редакцию 05.05.2023 г.

После доработки 22.05.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

В статье рассматриваются вопросы развития редкоземельной промышленности России. Отмечено, что Россия, располагая значительной ресурсной базой этого вида минерального сырья, не использует в полной мере имеющийся потенциал. Россия экспортирует полупродукты низких переделов, а ввозит товары, содержащие редкоземельные элементы, с высокой добавленной стоимостью. Ключевой проблемой отрасли является незначительный внутренний спрос на редкоземельные металлы. Растущий интерес в мире к возобновляемым источникам энергии создает новые возможности для развития российской редкоземельной отрасли и дает шанс для перехода российской экономики на новый технологический уклад. В основе политики по созданию спроса на редкоземельную продукцию внутри страны авторы предлагают использовать подход, основанный на рассмотрении проектов полного цикла. Подход характеризуется тремя основными особенностями. Во-первых, подход является расширением традиционного проектного подхода и учитывает не столько локальные аспекты отдельного проекта по добыче и переработке руды, сколько его встраивание в экономику страны через систему межотраслевых взаимодействий (мультипликативных эффектов). Во-вторых, по мере роста спроса на продукцию внутри страны и расширения масштабов применения изделий на основе редкоземельных металлов запускается процесс “обучения” – снижаются издержки на добычу, переработку и производство конечной продукции. В-третьих, подход предлагает рассматривать редкоземельные руды в отвалах как псевдофинансовые активы с возможностью управления ими как традиционными экономическими активами.

*Ключевые слова:* минерально-сырьевой сектор, редкоземельные металлы, цепочки создания стоимости, энергетический переход, ветроэнергетика, полный цикл, инновации

DOI: 10.31857/S0016777023050052, EDN: YIEGPI

### ВВЕДЕНИЕ

Россия располагает колоссальными ресурсами редкоземельных металлов<sup>1</sup>, уступая только Китаю. Однако скромный спрос на это сырье со стороны российской промышленности не дает стимулов к развитию отрасли. Сегодня на экспорт направляются продукты низких переделов, при этом высокотехнологичные изделия, содержащие

РЗМ, в основном импортируются. Таким образом, существенная доля добавленной стоимости формируется не в России, а отечественный редкоземельный потенциал используется не в полной мере.

Вместе с тем у России есть все возможности реализовать этот потенциал. Растущий интерес в мире к возобновляемым источникам энергии создает импульс для развития российской РЗМ-от-

<sup>1</sup> Редкоземельные элементы (РЗЭ) или редкоземельные металлы (РЗМ) представляют собой группу из 15 лантаноидов, имеющие порядковые номера от 57 до 71 (лантан, церий, празеодим, неодим, прометий, самарий, европий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций), иттрий, иногда скандий (порядковые номера, соответственно, 39 и 21). РЗМ разделяют на три группы по их атомному весу: легкие (La, Ce, Pr, Nd), средние (Sm, Eu, Gd) и тяжелые (Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y). С учетом конфигурации электронов в атомах РЗМ делят на цериевую (La, Ce, Pr, Nd) и иттриевую группы (Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y). В зарубежной литературе можно встретить следующие сокращения: REE – Rare Earth Elements, REM – Rare Earth Metals, RE – Rare Earths, TR – terrae rarae (латынь) – “редкие земли”, LREE – light REE, HREE – heavy REE, TREO – Total Rare Earth Oxides.

расли и дает шанс для перехода российской экономики на новый технологический уклад. Кроме того, выход России на глобальный рынок РЗМ крайне востребован – в мире прогнозируется дефицит РЗМ в контексте развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и звучат опасения, что темпы роста предложения этих металлов значительно отстают от планов развития генерирующих мощностей (J. Li и др., 2020; V. Ballinger и др., 2020). “Зеленая” энергетика (прежде всего ветровая) является высокотехнологичной сферой применения чистых РЗМ. Создание в России полных цепочек производства компонентов ветровых установок, ориентированных на внутренний спрос, может стать первым шагом к воссозданию конкурентоспособной отечественной РЗМ-промышленности.

При формировании спроса на РЗМ в России авторы предлагают исходить из подхода, основанного на проектах полного цикла. Такой подход является расширением традиционного проектного подхода и учитывает не столько локальные аспекты отдельного проекта по добыче и переработке руды, сколько его встраивание в экономику страны через систему межотраслевых взаимодействий. Кроме того, предлагается рассматривать проект разработки месторождения, содержащего комплексные руды, с точки зрения управления реальными (сырьевыми) активами для повышения финансовой устойчивости проекта в период колебаний спроса и в условиях ценовой неопределенности на компоненты, содержащиеся в рудах, например, для редкоземельных месторождений.

Авторы исходят из необходимости поэтапного восстановления и развития редкоземельной промышленности в России на основе формирования внутреннего спроса с учетом опыта Китая и других стран. На первом шаге может быть обеспечен выход российской РЗМ-продукции низких переделов на внешний рынок. Доходы от реализации в этом случае должны направляться как на реструктуризацию РЗМ-отрасли, так и на создание условий для наращивания внутреннего спроса на РЗМ. В дальнейшем необходимо развитие цепочки использования РЗМ в экономике (от начальных стадий к получению чистых металлов) с акцентом на повышение ее научно-технического уровня.

### РОССИЯ: КОЛОССАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ ПРИ НЕЗНАЧИТЕЛЬНОМ СПРОСЕ

Редкоземельная промышленность СССР занимала 3 место в мире по производству продукции (после Китая и США), годовой объем производства составлял 8,5 тыс. т<sup>2</sup>, что соответствовало 17% мирового рынка в 1990-х годах. При этом на

<sup>2</sup> Здесь и далее все цифры приведены в пересчете на оксиды РЗМ.

протяжении 70-х и до середины 80-х годов потребление было на уровне около 6 тыс. т в год, в 90-х годах – 8 тыс. т, а после 1991 г. – не превышало 3 тыс. т в год. На протяжении более чем 30 лет использование редкоземельных металлов в России не превышает этот новый уровень, который обеспечивается исключительно за счет импорта.

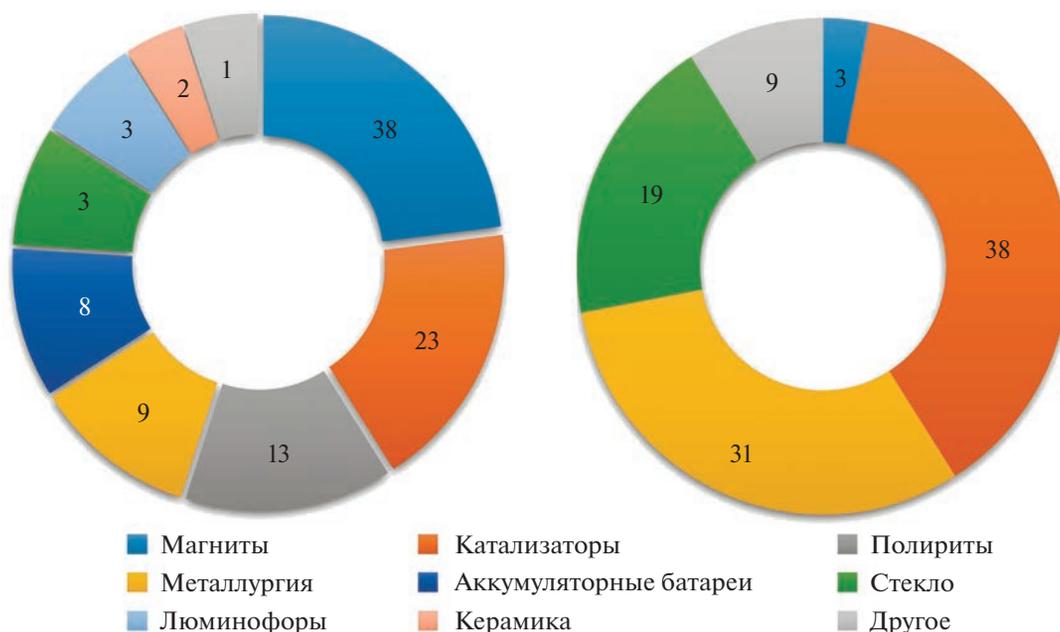
Основными потребителями РЗМ являются производители катализаторов для нефтехимии (легкие РЗМ – La, Ce, Pr, Nd), металлургии (смешанные РЗМ – например, мишметалл), а также полиритов (оксид церия). В этой связи структура потребления редкоземельного сырья и продукции в России существенно отличается от общемировой структуры, ориентированной преимущественно на производство постоянных магнитов на основе РЗМ (фиг. 1).

Мировой спрос на редкоземельную продукцию составляет около 200 тыс. т, на производство магнитных сплавов направляется треть этого объема. По некоторым оценкам, спрос на РЗМ в мире может составить 300 тыс. т к 2030 г., а к 2040 г. – 450 тыс. т, при этом на магнитные материалы – 100 и 150 тыс. т соответственно. В действительности рост потребления может быть взрывным и трудно прогнозируемым (International Energy Agency, 2021; Alonso E., 2012, Яценко, Лебедева, 2021).

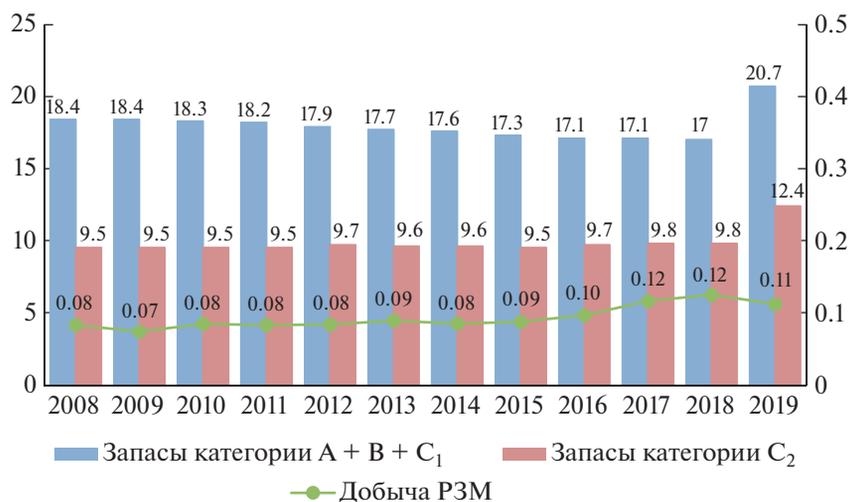
Также необходимо учитывать, что, во-первых, Китай продолжает консолидацию значительной части последующих стадий производственной цепочки – получение оксидов, индивидуальных РЗМ и сплавов на их основе, что способствует еще большей локализации добавленной стоимости. Во-вторых, в настоящий момент сформирована такая институциональная система, при которой крупные международные компании вынуждены переносить свои мощности в Китай для того, чтобы диверсифицировать риски поставок сырья для своего производства и сократить логистическое плечо для поставок готовой продукции потребителям. Таким образом, говоря о глобальном производстве высокотехнологичной продукции на основе РЗМ, подразумеваем, прежде всего, производство в Китае (USGS, 2022; Яценко, Крюков, 2022).

Величина доказанных запасов в мире составляет 120 млн т<sup>3</sup>, из которых в Китае находится 36,7%, во Вьетнаме – 18,3%, в России и в Бразилии – 17,5%, и только 1,5% в США (USGS, 2022). Причем, согласно национальной классификации минерально-сырьевых запасов и ресурсов, по категориям А, В, С1 и С2 на Государственном балансе запасов полезных ископаемых России учтено 33 млн т (здесь и далее все цифры приведены в

<sup>3</sup> Согласно классификации минерально-сырьевых запасов и ресурсов США (USGS, 2022).



Фиг. 1. Структура мирового потребления РЗМ (слева) и России (справа) на 2020–2022 гг., %.



Фиг. 2. Динамика запасов и добычи РЗМ в России за период 2008–2019 гг., млн т (на основе данных Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2019, 2020)

пересчете на оксиды РЗМ) на 2019 г., что уже соответствует доле 25% от общемировых запасов РЗМ (Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2019, 2020).

Отечественная статистика показывает, что с 2009 по 2018 гг. добыча РЗМ в России росла (только в 2019 г. произошло снижение до уровня 111.6 тыс. т), однако от этого количества менее 5% поступает на дальнейшую переработку (фиг. 2). Причина в том, что российская минерально-сырьевая база РЗМ в основном включает месторождения с апатит-нефелиновыми и лопаритовыми

рудами, суммарное содержание РЗМ в которых редко превышает 1%, поэтому этот вид сырья в основном является попутным компонентом добычи или вовсе не извлекается при отработке месторождения (Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2019, 2020).

После распада СССР в России сложилась парадоксальная ситуация: Соликамский магниевый завод (СМЗ, Пермский край) почти всю редкоземельную продукцию в виде коллективного концентрата карбонатов экспортирует, а оксиды, индивидуальные РЗМ и их соединения импортирует

для производства катализаторов, магнитов, электроники, оптики, керамики и другой продукции с высокой добавленной стоимостью. Отсутствие в стране высокотехнологичных производств и, как следствие, незначительное внутреннее потребление РЗМ не создает стимулов для создания рентабельных мощностей обогащения и выделения РЗМ из концентратов.

### ОСНОВНОЙ АКЦЕНТ – НА ДОБЫЧУ И ПРОИЗВОДСТВО КОНЦЕНТРАТА, А НЕ НА ПОЛНЫЙ ЦИКЛ

В настоящее время в России действует единственное предприятие “Ловозерский ГОК” (ЛГОК, Мурманская область), на котором добывают редкоземельную руду и поставляют лопаритовый концентрат на СМЗ. СМЗ отгружает 80% готовой продукции в виде соединений редкоземельных элементов на завод “AS Silmet”<sup>4</sup> (Эстония), где производится разделение на индивидуальные РЗМ (остальная часть продукции поставляется азиатским партнерам) (ОАО “Соликамский магниевый завод”, 2022).

Основная добыча РЗМ в России (88.9%) ведется на крупнейшем в мире предприятии по производству апатитового концентрата “Апатит”, входящем в холдинговую компанию “ФосАгро”. На втором месте по уровню добычи РЗМ в России – “Северо-Западная фосфорная компания” (СЗФК), входящая в группу компаний “Акрон” (является одним из крупнейших мировых производителей минеральных удобрений). СЗФК обеспечивает 12.6% добычи РЗМ в стране (Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2019, 2020). В 2016 г. компания запустила производственную линию по выделению концентрата РЗМ мощностью 200 т в год из технологических потоков переработки апатитового концентрата месторождения Олений Ручей (Мурманская область) с дальнейшим получением оксидов церия, лантана, неодима, а также концентратов легкой, средней и тяжелой групп РЗМ. Однако в 2021 г. низкие цены на РЗМ привели к отрицательной рентабельности производства, поэтому цех был остановлен и законсервирован (ПАО “Акрон”, 2021).

Стоит отметить, что основным побочным продуктом производства минеральных удобрений является фосфогипс. На текущий момент в отвалах накоплено около 200 млн т этого вещества. В отвалах содержится 80–98% гипса и около 1 млн т РЗМ. Ежегодный прирост фосфогипса в отвалах составляет 10–15 млн т. Решением этой задачи занимается компания “Лаборатория инновацион-

ных технологий” (ЛИТ), которая входит в холдинг “Скайград” (г. Юбилейный, Московская область). “Скайград” планирует создать крупное промышленное производство с объемом переработки до 2 тыс. т в год в г. Пересвет (Московская область) (Группа компаний “Скайград”, 2021).

Перспективным проектом для развития отечественной промышленности также может стать освоение ниобий-редкоземельного месторождения Томтор в Республике Саха (Якутия). Недропользователь – компания “ТриАрк Майнинг”<sup>5</sup> – планирует выйти на мощность добычи сухой руды 160 тыс. т с получением товарной продукции порядка 20 тыс. т. Товарная продукция будет включать оксиды лантана, церия, празеодима, неодима, концентрат среднетяжелой группы РЗМ, а также концентрат скандия и феррониобия. Для этих целей в 2019 г. в рамках Восточного экономического форума были заключены кредитные соглашения между ВЭБ, “Восток Инжиниринг” (дочерние компании ООО “ТриАрк Майнинг” и оператор участка Буранный) и ООО “Краснокаменский гидрометаллургический комбинат” (ООО “КГМК”) на сумму 1.5 млрд руб., часть из которых будет направлена на строительство и ввод оборудования для создания горнодобывающего и перерабатывающего предприятий (Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2019, 2020; ООО “ТриАрк Майнинг”, 2022).

Важно также отметить, что разработка минерально-сырьевой базы РЗМ в России осложняется тем, что в стране нет технологий извлечения РЗМ из отходов недропользования (вскрышные и вмещающие горные породы, шламы, хвосты обогащения полезных ископаемых и др.) и производства других металлов. Инвесторы не склонны активно развивать проекты добычи РЗМ – они низкорентабельные и капиталоемкие, а доминирование на рынке китайских поставщиков делает риски такого рода инвестирования слишком высокими (Яценко, Крюков, 2022).

### ПОДХОД К АНАЛИЗУ НА ОСНОВЕ ПРОЕКТОВ ПОЛНОГО ЦИКЛА: ПРИЛОЖЕНИЕ В СФЕРЕ РЗМ

Одна из ключевых особенностей РЗМ состоит в тесной взаимосвязи и взаимообусловленности процессов обогащения и использования, а также в увязке всех стадий в рамках единой цепочки

<sup>4</sup> С 2011 г. завод “AS Silmet” принадлежит американской компании “Neo Performance Materials” (ранее “Molycorp”, США)

<sup>5</sup> Первоначально компания ООО “ТриАрк Майнинг” была совместным предприятием ГК Ростехнологии и Группы ИСТ. В 2019 г. Ростех передал свою долю (25% плюс одна акция) кипрской компании Zaltama Holding Ltd, которая вышла из проекта в следующем году. В это же время компания АО “Полиметалл” приобрела 9.1% ООО “ТриАрк-Майнинг” за 20 млн долл. США (Polymetal International plc, 2020).



Фиг. 3. Проект замкнутого цикла на основе цепочки в минерально-сырьевом секторе.

процессов. В России в настоящее время таких цепочек или нет, или они чрезвычайно коротки, охватывают в основном процессы освоения сырьевых ресурсов и получения полупродуктов.

Проект замкнутого цикла в традиционном понимании приведен на фиг. 3. Проект понимается как приращение добавленной стоимости от добычи руды до производства высокотехнологичных товаров с последующей утилизацией.

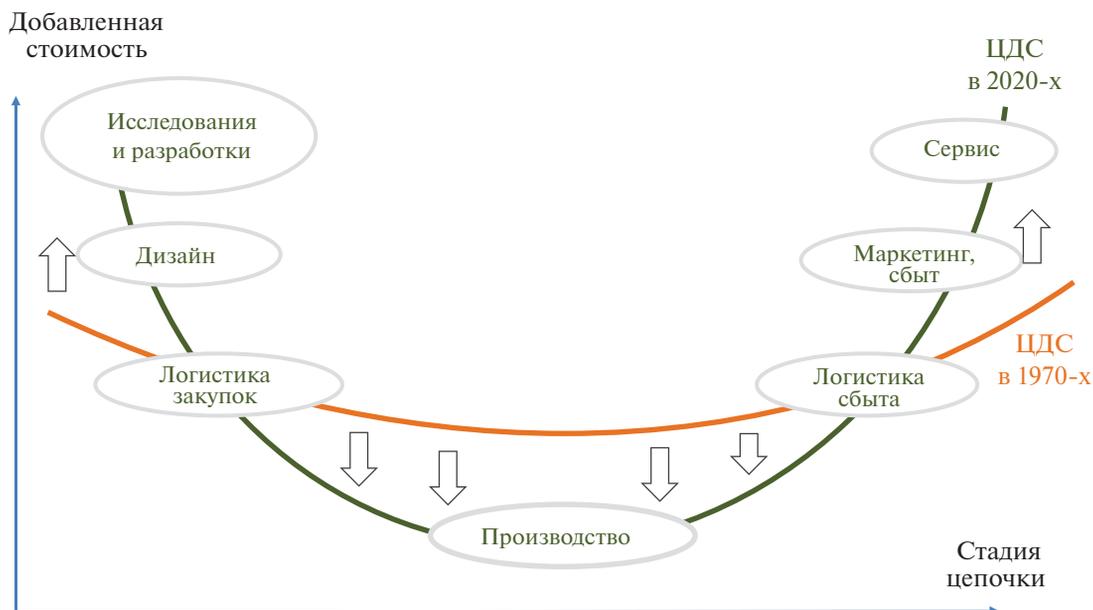
В рамках последовательных этапов цепочки создания стоимости увеличивается ценность каждого следующего промежуточного полупродукта для того, чтобы повысить результирующую ценность изделия на выходе. Такой подход безусловно необходим, но, по мнению авторов, он в недостаточной мере отражает встраивание проекта в экономику страны. Кроме того, традиционный подход менее сконцентрирован на ранних и заключительных этапах (стадиях) цепочки, значение которых с точки зрения вклада в приращение добавленной стоимости за последние десятилетия увеличилось (фиг. 4).

В этом контексте можно говорить не просто о проекте замкнутого цикла, а о расширении рамок проекта — рассмотрении проекта полного цикла. Такая трактовка предполагает анализ вопросов встраивания проектов в экономику страны в тесной взаимосвязи с решением научно-технологических вопросов.

Ключевая направленность подхода, связанного с проектами полного цикла — формирование спроса на конечную продукцию цепочки (в случае РЗМ — оксиды и чистые металлы) и его научно-технологическое обеспечение. Традиционно применительно к РЗМ ведется речь только об удлинении цепочек, а вопросам формирования спроса уделяется недостаточно внимания. Например, при оценивании масштабов проекта прежде всего определяются объемы производства (добычи руды или производства полупродуктов низких переделов), которые требуются для окупаемости проекта. И, как правило, делается вывод, что в текущих условиях для обеспечения окупаемости самое очевидное решение — экспорт полупродуктов, а удлинение цепочек на основе создания спроса нецелесообразно из проектных соображений. Экспорт низкообогащенного сырья допустим, но исключительно на ранней стадии РЗМ-проекта и с гарантией направления части доходов на развитие последующих переделов.

Следует остановиться на трех взаимосвязанных элементах подхода — управлении мультипликативными эффектами, эффекте “обучения” и управлении рудами в отвалах как псевдофинансовыми активами.

*Мультипликативные эффекты.* Предлагаемый нами подход рассмотрения РЗМ-отрасли с точки зрения совокупности проектов полного цикла позволяет соединить чисто проектное понимание



Фиг. 4. Приращение добавленной стоимости при производстве условного изделия на различных стадиях цепочки: сравнение 1970-х и 2020-х гг.

создания стоимости конечного продукта с вопросами встраивания проектов в систему межотраслевых связей.

Прежде всего, минерально-сырьевой проект полного цикла, цепочка которого локализована в рамках страны, формирует прямые и косвенные мультипликативные эффекты. В России традиционно о мультипликативном влиянии идет речь применительно к нефтегазовым проектам, однако проекты в РЗМ-сфере также потенциально могут рассматриваться как создающие эффект в смежных отраслях.

Мультипликативный эффект РЗМ-проекта состоит в создании новых рабочих мест в рамках всей цепочки создания и развития технологических компетенций. Под прямыми мультипликативными эффектами в этом случае понимаются капитальные затраты, понесенные инвестором в рамках реализации проекта и увеличивающие региональный продукт только территории (региона) реализации проекта. В качестве косвенных эффектов рассматривается связанное увеличение спроса на товары и услуги производств, технологически и логистически связанных между собой, в других регионах страны (Крюков В.А., Крюков Я.В., 2017).

В российском минерально-сырьевом секторе преобладают прямые локальные эффекты, тогда как в западных странах – косвенные. Это различие говорит о том, что в западных странах сырьевой сектор активно вовлечен в реализацию минерально-сырьевых проектов через систему межотраслевых связей, а в России такой взаимосвязи нет по причине коротких цепочек и локали-

зации проектов и их результатов в рамках только территорий реализации проекта. В этом смысле необходимо управление мультипликативными эффектами в экономике в целом для создания спроса на РЗМ-продукцию. Такое управление должно выходить за рамки цепочек производства и потребления РЗМ. Механизм такого управления – создание условий для формирования производства не только высокотехнологичного отечественного горно-шахтного оборудования, но и для стимулирования роста спроса на ветровую энергию как источник спроса на РЗМ-компоненты.

*Эффект “обучения”.* Рост спроса на конечную высокотехнологичную РЗМ-продукцию обладает еще одним свойством – эффектом “обучения”. По мере увеличения охвата цепочек, связанного с расширением межотраслевых взаимодействий, снижаются издержки на добычу, переработку и производство конечной продукции (в том числе и в РЗМ-сфере). Рост спроса и расширение масштабов применения РЗМ-изделий приводит к появлению новых технологий производства, т.е. запускается процесс “обучения”. Со стратегической точки зрения снижение издержек, вызываемое эффектом “обучения”, обеспечивает преимущество по себестоимости продукции, что ведет к снижению цены, увеличению доли рынка и в конечном счете – к росту прибыли. Пример эффекта “обучения” с точки зрения РЗМ-отрасли – использование неодимовых магнитов в генераторах ветровых установок снижает металлоемкость этих установок и делает ветровую энергию более конкурентоспособной.

*Управление комплексными рудами как потенциальными экономическими активами.* Руды, содержащие РЗМ, включают комплекс ценных компонентов, по-разному востребованных в зависимости от динамики спроса на конечную высокотехнологичную продукцию, в которой эти компоненты используются. Так, компоненты, имеющиеся на рынке с избытком, более целесообразно держать в отвалах. Это позволяет формировать своего рода портфель активов из переработанных руд и управлять рудными отвалами как псевдофинансовыми активами. Это не означает, что добыча сдерживается потребностями рынка – часть ценных компонентов хранится, ожидая более экономически привлекательных условий для выхода на рынок. Управление активами в такой форме также возможно в случае, когда растет спрос и отсутствуют мощности по обогащению или не сформирован рынок конечной продукции (российские условия).

В основу предлагаемого подхода также может быть положен опыт Китая по формированию РЗМ-отрасли, сочетающий в себе прагматизм и поощрение инициативы на местах, а также нацеленность на решение внутриэкономических проблем – диверсификацию экономики и рост ее научно-технического уровня.

В процессе создания и развития РЗМ-отрасль Китая прошла через несколько последовательных стадий:

- импульс со стороны государства, нацеленный на рост добычи РЗМ с целью увеличения занятости и формирования основ новой отрасли;
- параллельно – увязка экспорта низкообогащенного сырья с возвратом части доходов на развитие последующих переделов;
- поступательное развитие цепочки использования РЗМ в экономике (от начальных стадий к получению чистых металлов);
- переход на развитие РЗМ-индустрии на основе конкурентного взаимодействия ее участников;
- акцент на повышение научно-технического уровня: в 2022 г. анонсирован пакет государственной поддержки полупроводниковой промышленности (одного из ключевых потребителей РЗМ), составил 143 млрд долл., а его цель – снижение зависимости от зарубежных поставок, переход на самообеспечение и смягчение санкционного давления со стороны США в этой области (Ведомости, 2022).

Поэтапный динамический и сбалансированный подход Китая (с точки зрения взаимосвязи системы мер) к развитию РЗМ-отрасли может быть реализован и в российских условиях. На начальном этапе представляется наиболее важным выход на внешние рынки при условии, что доходы от реализации сырья низких переделов на ран-

них этапах должны направляться на реструктуризацию связанных производств и рост мультипликатора (в части косвенных расходов).

Отправной точкой реализации предложенных мер и шагов может выступать ветровая энергетика как наиболее перспективный потребитель РЗМ-сырья в условиях растущего спроса на “зеленые” технологии.

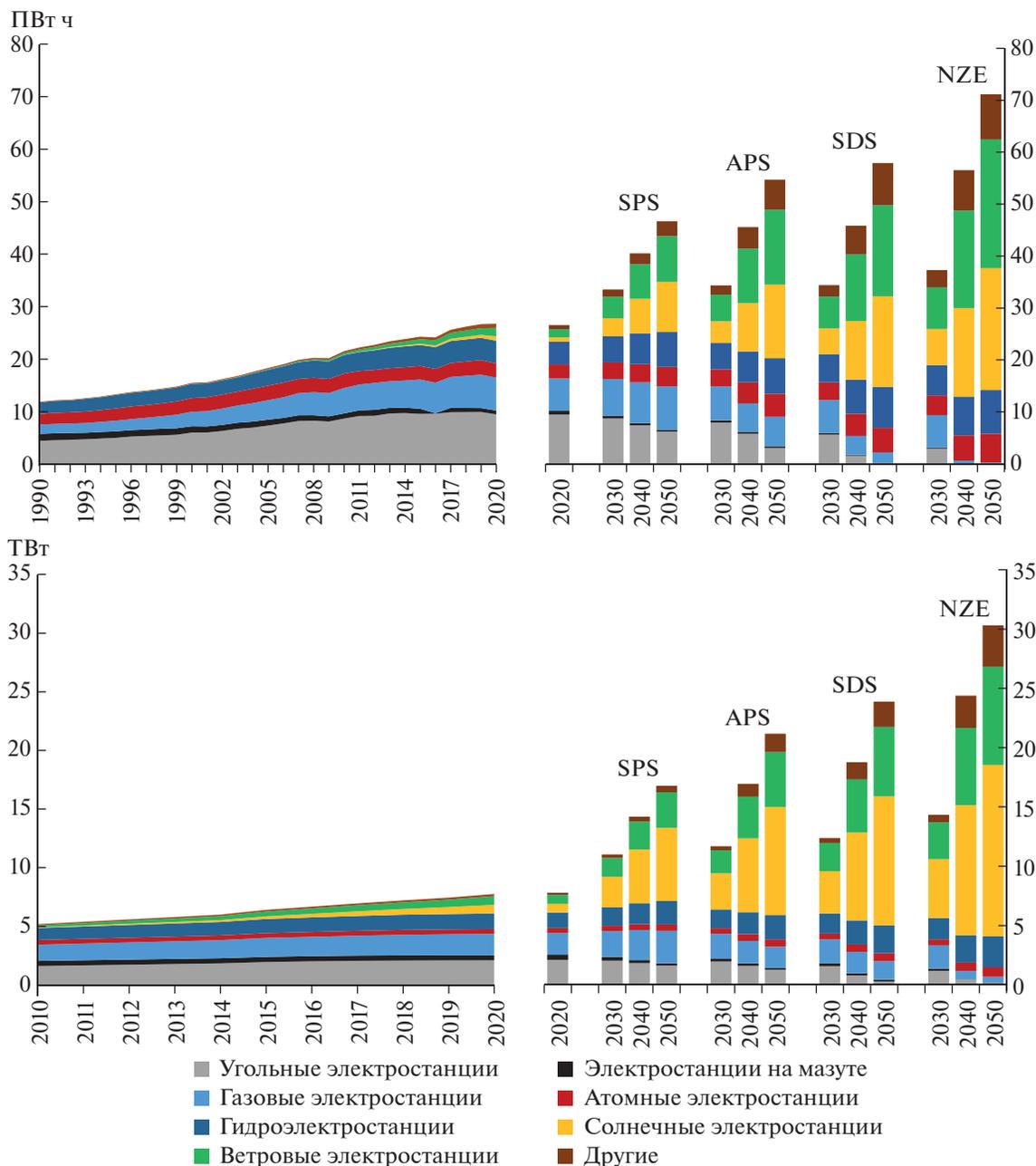
## ВЕТРОЭНЕРГЕТИКА – СТАРТОВЫЙ ИМПУЛЬС РОСТА ВНУТРЕННЕГО СПРОСА НА РЗМ В РОССИИ

В настоящее время одним из ключевых мировых экономических трендов является переход на низкоуглеродное развитие за счет сокращения выбросов парниковых газов и использования экологически чистых технологий производства тепло- и электроэнергии. Эти шаги были окончательно оформлены в рамках Парижского соглашения, подписанного в 2015 г. на 21-й сессии конференции ООН об изменении климата. Очевидно, что переход к новым технологиям производства энергии будет существенным образом влиять на горнодобывающую промышленность, поскольку в основе этого перехода лежит активное использование таких важнейших химических элементов, как медь, никель, литий, кобальт и, конечно, РЗМ. Именно постоянные магниты на основе РЗМ во многом являются ключом к переходу на “зеленую” траекторию развития на базе возобновляемой энергетики. Эти металлы используются в электрических машинах ветрогенераторов, гибридных и электромобилях, производство которых растет с каждым годом.

Энергопереход по сути является перераспределением генерации электроэнергии между различными источниками за счет появления новых технологий, которые позволяют напрямую получать электричество из энергии солнца или ветра. К таким технологиям можно отнести фотогальванические (фотоэлектрические) панели<sup>6</sup> и ветроэнергетические установки (ВЭУ), которые среди возобновляемых источников энергии по установленным мощностям и объему генерируемой энергии.

Существуют разные оценки развития глобальной структуры энергетики, в которых отчетливо выражены схожие тренды. Например, согласно прогнозам Международного энергетического агентства (МЭА), к концу текущего десятилетия общая установленная мощность SPV-панелей в мире может вырасти более чем в три раза – с 739 до 2550 ГВт, а номинальная мощность ВЭУ, как ожидается, вырастет более чем два раза – с 737 до 1600 ГВт. Причем ожидается, что в совокупности

<sup>6</sup> Solar photovoltaic или solar PV (SPV).



**Фиг. 5.** Производство электроэнергии в мире за 1990–2020 гг. (сверху), объем установленной мощности за период 2010–2020 гг. (снизу) и сценарии прогноза согласно данным МЭА до 2050 г. (на основе данных International Energy Agency, 2021)).<sup>7,8</sup>

<sup>7</sup> Другие источники производства электроэнергии: из водорода и аммиака, гелиоконцентраторы, геотермальные, морские и аккумуляторные батареи.

<sup>8</sup> В отчете “The World Energy Outlook-2021” рассматриваются следующие основные сценарии (они не являются точными прогнозами):

– В сценарии The Stated Policies Scenario (SPS) предполагается, что обязательства по сокращению выбросов CO<sub>2</sub> к 2050 г. будут выполнены правительствами всего мира частично.

– В сценарии The Announced Pledges Scenario (APS) предполагается, что все обязательства по сокращению выбросов CO<sub>2</sub> к 2050 г. будут выполнены правительствами всего мира полностью, в том числе на национальном уровне.

– Сценарий The Sustainable Development Scenario (SDS) соответствует сценарию APS. Причём страны с развитой экономикой достигают нулевого уровня выбросов к 2050 г., Китай – к 2060 г., а все остальные страны – самое позднее к 2070 г.

– Сценарий The Net Zero Emissions by 2050 Scenario (NZE) соответствует ключевым целям развития ООН – достижение нулевых выбросов CO<sub>2</sub> к 2050 г. и полного доступа населения к электроэнергии к 2030 г.

**Таблица 1.** Производство электроэнергии по странам в 2020 г. (первый столбец), рост (второй столбец) и совокупный среднегодовой темп роста (третий столбец) за период 2010–2020 гг.

Страна	Общее производство электроэнергии			Возобновляемые источники энергии			Ветроэнергетика			Солнечная энергетика		
	2020	2010–2020		2020	2010–2020		2020	2010–2020		2020	2010–2020	
	ТВт ч	ТВт ч	%	ТВт ч	ТВт ч	%	ТВт ч	ТВт ч	%	ТВт ч	ТВт ч	%
Китай	7787	3551	5.7	2222	1431	9.8	471	426	23.8	270	269	66.4
Индия	1609	637	4.7	360	200	7.7	68	48	11.8	64	64	79.9
Япония	1003	–161	–1.3	234	119	6.7	8	4	6.5	79	75	31.2
США	4243	–111	–0.6	842	390	4.4	340	245	10.0	117	114	18.0
ЕС	2757	–200	–0.6	1082	410	4.4	398	258	10.0	142	119	18.0
Бразилия	605	89	1.5	515	78	1.5	57	55	35.6	8	8	48.9
Россия	1057	21	0.2	195	25	1.3	1	1	81.7*	2	2	92.2**
<b>Всего</b>	<b>26762</b>	<b>5244</b>	<b>2.0</b>	<b>7593</b>	<b>3342</b>	<b>5.4</b>	<b>1595</b>	<b>1253</b>	<b>15.0</b>	<b>833</b>	<b>801</b>	<b>34.5</b>

Примечание. \*За период 2015–2020 гг., \*\*за период 2014–2020 гг.

солнечная и ветровая энергетика дадут 80% от всего прироста (фиг. 5) (International Energy Agency, 2021).

Отдельно стоит выделить китайскую энергетическую программу, в рамках которой за период 2010–2020 гг. производство электроэнергии выросло почти в 2 раза (ветровая генерация – в 10 раз, солнечная – в 270 раз) (табл. 1). Также показателен существенный рост генерации электроэнергии в Индии, в том числе за счет ВИЭ. Суммарно за период 2010–2020 гг. среднегодовой темп роста<sup>9</sup> выработки электроэнергии в мире составил 2%, а возобновляемых источников энергии – 5.4%. При этом ветроэнергетика показала рост 15%, солнечная энергетика – 34.5%.

Из табл. 1 следует, что ветроэлектростанции (ВЭС) в Китае генерируют 30% от общего производства электроэнергии в мире, в Европе – около 25% и в США – чуть более 21%. В России производство электроэнергии на основе ВИЭ в 2019–2020 гг. составило лишь 1 ТВт ч для солнечной энергетика и 2 ТВт ч для ветроэнергетика, что существенно ниже общемировых значений. Однако наша страна имеет высокий потенциал для развития ВИЭ, поскольку обладает самой большой в мире территорией (17.1 млн км<sup>2</sup>, что немного меньше целого континента – Южной Америки с площадью 17.8 млн км<sup>2</sup>) с разнообразными климатическими условиями и самым протяженным континентальным шельфом (более 6 млн км<sup>2</sup>). Кроме того, опыт европейских стран показал, что морской ветер обеспечивает более высокую мощность и менее переменчив, чем береговой. В этой связи строительство ВЭУ на шельфе обладает

<sup>9</sup> Здесь и далее приводятся совокупные среднегодовые темпы роста – compound annual growth rate (CAGR).

экономическими и эксплуатационными преимуществами за счет возможности установки самых мощных генераторов из существующих.

Если с начала 2000-х гг. в России появились производители солнечных панелей<sup>10</sup> с полной технологической цепочкой, которые экспортируют свою продукцию в страны Евразии и Азиатско-Тихоокеанского региона и заняли свою конкурентную нишу, то производителей ВЭУ с полной технологической цепочкой сегодня в стране нет. Бурное развитие национальной ветроэнергетики на основе зарубежных технологий производства в период 2015–2021 гг. (табл. 1) полностью остановилось с 2022 г. Ключевые технологические партнеры в этой сфере – компании Vestas и Siemens Gamesa – разорвали связи с российскими Фондом развития ветроэнергетики (ФРВ)<sup>11</sup> и ПАО “Энел Россия”<sup>12</sup> (Российская Ассоциация Ветроиндустрии, 2022).

К сожалению, отечественная ветроэнергетическая отрасль не успела перестроиться и сформировать спрос на критически важные химические элементы. Кроме того, локализация соглас-

<sup>10</sup> Производство солнечных батарей в России налажено на разных предприятиях: НПП “Квант” (Москва), ЗАО “Телеком-СТВ” (Зеленоград), ООО “Хевел” (Новочебоксарск), АО “РЗМКП” (Рязань), завод “Сатурн” (Краснодар), ООО “Юнисолэкс” (Краснодар) и др.

<sup>11</sup> Фонд развития ветроэнергетики (ФРВ) создан на паритетной основе АО “Роснано” и ПАО “Фортум” в целях инвестирования в строительство ветропарков и запуска ветроэнергетических проектов. Управление ФРВ осуществляет ООО “УК “Ветроэнергетика”, принадлежащая партнерам в равных долях.

<sup>12</sup> ПАО “Энел Россия” является генерирующей компанией и ключевым активом Группы Enel в России. Компания обеспечивает электро- и теплоснабжение промышленных предприятий и бытовых потребителей.

но первому нормативному документу, который регламентирует правила рынка – Распоряжению Правительства РФ от 24.10.2020 № 2749-р “О внесении изменений в распоряжение Правительства РФ от 08.01.2009 № 1-р”, не была нацелена на построение производства полного цикла. По сути, предполагалась организация сборочного цеха на импортных комплектующих. По этой причине в полной мере не были реализованы механизмы поддержки на оптовом рынке электроэнергии и мощности России (ОРЭМ). Эти механизмы предполагали конкурсный отбор проектов ВИЭ и заключение с инвесторами договоров о предоставлении мощности квалифицированных генерирующих объектов, функционирующих на основе использования возобновляемых источников энергии (ДПМ ВИЭ).

Стоит отметить компанию АО “НоваВинд”<sup>13</sup>, которая в большей степени продвинулась в части локализации цепочки производства ВЭУ на основе турбин, разработанных голландским технологическим партнером Lagerwey Systems B. V. В 2023 г. по итогам конкурсного отбора проектов в сегменте ветроэнергетики единоличным победителем отбора стало ООО “Уралэнергосбыт”, которое должно будет ввести почти 0.74 ГВт мощностей ВЭС в России до 2030 г. (АО “АТС”, 2013). При этом 50% этой компании принадлежит ПАО “Фортум”, основанному финским энергетическим концерном Fortum, который находится в процессе ухода с российского рынка и не собирается инвестировать в российскую ветроэнергетику (Fortum, 2023). Это значит, что все инвестиции и локализация производственной цепочки российской компании АО “НоваВинд” оказались невостребованными в России, и, вероятно, наша ветроэнергетика будет дальше развиваться за счет готовых решений китайской промышленности.

Для отечественной промышленности технологическая зависимость на этой стадии не заканчивается, поскольку для всех электрических машин ВЭУ требуются постоянные неодимовые магниты. Например, ветрогенератору LP2 L100-2.5 (АО “НоваВинд”) необходимо 8.3 тыс. магнитов данного типа, общий вес которых составляет 3.3 т. Это означает, что компании АО “НоваВинд” было бы необходимо 680–980 т неодимовых магнитов за период 2025–2029 гг., если бы компания победила в конкурсном отборе вместо ООО “Уралэнергосбыт”.

<sup>13</sup>АО “НоваВинд” – дивизион Госкорпорации “Росатом”, основная задача которого – консолидировать усилия Госкорпорации в передовых сегментах и технологических платформах электроэнергетики и в том числе – в ветроэнергетике. Совместное предприятие компании АО “НоваВинд” и голландского технологического партнера Lagerwey Systems B. V. (дочерняя компания немецкого ветроэнергетического гиганта Enercon GmbH) – Red Wind B. V., локализовало производство ВЭУ в России на основе турбин, разработанных Lagerwey Systems B. V.

После распада СССР в России осталось несколько промышленных предприятий, обладающих необходимыми технологическими компетенциями и требуемым оборудованием для производства магнитов на основе РЗМ. Однако большая часть из них остановила производство и занимается механической обработкой из заготовок с дальнейшей перепродажей. Сегодня уровень производства в стране, по нашим оценкам, составляет не более 200–300 т в год. Основная проблема заключается в том, что Россия не располагает полной цепочкой производства редкоземельной продукции, поэтому все сырье для производства магнитов импортируется (например, быстрозакаленный порошок, получение чистого железа и бора). Это ставит российскую высокотехнологичную промышленность в зависимость от импортной редкоземельной продукции (прежде всего китайской). Кроме того, во многих отраслях был потерян интеллектуальный потенциал: технологии, специализированное оборудование и возможности их эффективного создания.

Такая ситуация в российской промышленности вынуждает крупные государственные компании, обладающие необходимыми научно-технологическими компетенциями, осуществлять поэтапную локализацию производства постоянных магнитов (неодимовых, самарий-кобальтовых и иных) для ключевых потребителей. Так, в рамках контракта между компаниями ООО “Элемаш Магнит”<sup>14</sup> и Red Wind B. V.<sup>15</sup> планируется создать производство постоянных магнитов полного цикла. Холдинг “Росэлектроника”, входящий в структуру ГК “Ростех”, также обладает всеми необходимыми компетенциями для производства редкоземельных магнитов на базе АО “Спецмагнит” и АО “НПП Исток им. А.И. Шокина”.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основная проблема российских проектов в сфере производства РЗМ связана с тем, что в стране отсутствуют взаимосвязанные и взаимодополняющие цепочки, которые бы выходили на конечные изделия, связанные с формированием

<sup>14</sup>Дочернее предприятие ПАО “Ковровский механический завод”, входящее в Топливную компанию “ТВЭЛ” государственной компании “Росатом”, которое специализируется на изготовлении наукоёмкой и технически сложной продукции.

<sup>15</sup>АО “НоваВинд” – дивизион Госкорпорации “Росатом”, основная задача которого – консолидировать усилия Госкорпорации в передовых сегментах и технологических платформах электроэнергетики и в том числе – в ветроэнергетике. Совместное предприятие компании АО “НоваВинд” и голландского технологического партнера Lagerwey Systems B. V. (дочерняя компания немецкого ветроэнергетического гиганта Enercon GmbH) – Red Wind B. V., локализовало производство ВЭУ в России на основе турбин, разработанных Lagerwey Systems B. V.

рынка для внутреннего потребления при реализации этих уникальных проектов. Ключом к решению этой проблемы является формирование нишевых рынков, цепочек взаимодействия и процедур, которые были бы ориентированы на учет взаимных интересов участников РЗМ-цепочки (не только производителей, но и конечных потребителей высокотехнологичных изделий). Примером такого перспективного нишевого рынка является “зеленая” энергетика.

Долгое время в России применительно к отраслям минерально-сырьевого сектора рассматривался “рыночный” вариант формирования цепочек. Вариант исходит из того, что институциональная среда сама регулирует все процессы и взаимодействия, а цепочки формируются во многом стихийным образом. По нашему мнению, такой подход подтвердил свою нежизнеспособность – в России не сформирована соответствующая институциональная среда. В современных условиях целесообразен эволюционный (поэтапный) путь перехода к взаимодействию разных участников цепочки в РЗМ-отрасли.

Начальный этап этого пути предполагает стимулирование спроса на РЗМ, регулирование и сопровождение со стороны государства и по мере развития – уменьшение форм прямого воздействия. Следует понимать, что отдача от РЗМ-проектов не может быть сиюминутной и вопросы эффективности проектов на первом этапе не могут являться приоритетными. Со временем сыграет роль эффект “обучения” – по мере роста спроса на конечную продукцию и развития технологических компетенций будут снижаться издержки и расти эффективность отдельных проектов.

Также России следует ориентироваться на политику Китая в вопросах создания РЗМ-отрасли. Ключевыми элементами этой политики является ориентация на действие мультипликатора и расширенное понимание проектного цикла. В Китае принята долгосрочная система шагов и мер по выводу страны в число ведущих производителей не только первичных материалов и руды, содержащей редкие земли, но и чистых металлов, а также комплектованных и изделий. Однако это требует иной управленческой парадигмы.

По нашему мнению, в России такой парадигмой может быть развитие РЗМ-индустрии через создание спроса в контексте проектов полного цикла. Это может быть поэтапный поступательный подход, который включает гибкое сочетание объемов выпуска на начальных и последующих переделах – как с позиции экспорта, так и (прежде всего) развития внутреннего рынка высокотехнологичной продукции. Принципиально важным также представляется встраивание вопросов использования РЗМ в условия недропользования.

Подход на основе проектов полного цикла на примере РЗМ-индустрии предполагает встраивание проектов в систему межотраслевых связей на уровне экономики в целом. Это может быть реализовано на примере продуктов на основе неодима, востребованных в быстрорастущей сфере ветровой генерации электроэнергии. На первом шаге может быть обеспечен выход на внешние рынки продуктов низких переделов с условием направления доходов от реализации целевым образом на развитие спроса внутри страны. Также подход исходит из важности научно-технической составляющей и возможности применения портфельного подхода к управлению стоимостью продуктов переработки комплексных руд.

## БЛАГОДАРНОСТИ

В статье представлены результаты исследования, выполненного в ИЭОПП СО РАН в рамках Проекта 5.6.3.2. (0260-2021-0004) “Ресурсные территории Востока России и Арктической зоны: особенности процессов взаимодействия и обеспечения связанности региональных экономик в условиях современных научно-технологических и социальных вызовов”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

“Акрон” останавливает производство редкоземельных элементов в Великом Новгороде [Электронный ресурс]. ПАО “Акрон”: [Сайт]. URL: [https://www.acron.ru/press-center/press-releases/200802/?sphrase\\_id=34334](https://www.acron.ru/press-center/press-releases/200802/?sphrase_id=34334) (дата обращения: 06.07.2021).

Ветроэнергетика [Электронный ресурс]. Российская Ассоциация Ветроиндустрии: [Сайт]. URL: <https://rawi.ru/windpower> (дата обращения: 05.02.2022).

Годовые отчеты [Электронный ресурс]. ОАО “Соликамский магниевый завод”: [Сайт]. URL: <https://smw.ru/shareholder/everyear> (дата обращения: 24.06.2022).

Государственный доклад “О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году” [Электронный ресурс]. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации: [Сайт]. URL: [https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyye\\_doklady/gosudarstvennyy\\_doklad\\_o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_2020](https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennyye_doklady/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_2020) (дата обращения: 10.04.2023).

Государственный доклад “О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году” [Электронный ресурс]. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации: [Сайт]. URL: [http://www.mnr.gov.ru/docs/o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/gosudarstvennyy\\_doklad\\_o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii](http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii) (дата обращения: 21.02.2021).

Добыча [Электронный ресурс]. ООО “ТриАрк Майнинг”: [Сайт]. URL: <https://www.threearc.ru/ru/dobycha-rudy.php> (дата обращения: 12.09.2022).

Китай планирует пакет помощи полупроводниковой промышленности на \$143 млрд [Электронный ресурс] //

“Ведомости”, 14.12.2022 г. [Сайт] <https://www.vedomosti.ru/economics/articles/2022/12/14/955135-kitai-plan-iruet-paket-pomoschi-poluprovodnikovoi-promishlennosti> (дата обращения: 20.12.2022).

*Крюков В.А., Крюков Я.В.* Как раздвинуть рамки арктических проектов // ЭКО. 2017. № 8. С. 5–30.

Приобретение 9.1% доли в проекте Томтор [Электронный ресурс]. Polymetal International plc: [Сайт]. URL: <https://www.polymetalinternational.com/ru/investors-and-media/news/press-releases/19-03-2020> (дата обращения: 26.03.2020).

Производство [Электронный ресурс]. Группа компаний “Скайград”: [Сайт]. URL: <http://rzm.sky-grad.ru/factory/proizvodstvo> (дата обращения: 14.05.2021).

Результаты отборов проектов [Электронный ресурс]. АО “АТС” [Сайт]. URL: <https://www.atsenergo.ru/vie/proresults> (дата обращения: 01.04.2023).

*Яценко В.А., Крюков Я.В.* Фрагментация и консолидация производственных цепочек в мировой редкоземельной промышленности // Горная промышленность. 2022. № 1. С. 66–74. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-1-66-74>

*Яценко В.А., Лебедева М.Е.* Прогноз динамики спроса на мировом рынке редкоземельных металлов // Мир экономики и управления. 2021. Т. 21. № 4. С. 124–145. <https://doi.org/10.25205/2542-0429-2021-21-4-124-14>

*Alonso E.* и др.. Evaluating Rare Earth Element Availability: A Case with Revolutionary Demand from Clean Technologies 2012. <https://doi.org/10.1021/es203518d>

*Li J., Peng K., Wang P., Zhang N., Feng K., Guan D., Meng J., Wei W., Yang Q.* Critical Rare-Earth Elements Mismatch Global Wind-Power Ambitions [Electronic resource]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332220302980> (accessed: 15.02.2023).

Fortum’s Russian joint venture has participated in a local wind auction – Fortum will not invest in Russia [Electronic resource]. Fortum: [Site]. URL: <https://www.fortum.com/media/2023/04/fortums-russian-joint-venture-has-participated-local-wind-auction-fortum-will-not-invest-russia> (accessed: 19.04.2023).

Rare Earths Statistics and Information [Electronic resource]. National Minerals Information Center: U.S. Geological Survey. URL: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information> (accessed: 30.08.2022).

The role of critical minerals in clean energy transitions [Electronic resource]. International Energy Agency (IEA): [Site]. URL: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions> (accessed: 11.04.2022).

*Ballinger B., Schmeda-Lopez D., Kefford B., Parkinson B., Stringer M., Greig C., Smart S.* The vulnerability of electric-vehicle and wind-turbine supply chains to the supply of rare-earth elements in a 2-degree scenario [Electronic resource]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352550919304713> (accessed: 15.02.2023).

World Energy Outlook 2021 [Electronic resource]. International Energy Agency: [Site]. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021> (accessed: 11.03.2022).

УДК 553.3.072

## ГЕОСТРАТЕГИЧЕСКИЕ РИСКИ ПРИ ПЕРЕХОДЕ К ЗЕЛЕНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ (НА ПРИМЕРЕ АФРИКИ)

© 2023 г. И. О. Абрамова<sup>а</sup>, \*, А. Ю. Шарова<sup>а</sup>, \*\*

<sup>а</sup>Институт Африки РАН, ул. Спиридоновка, д. 30/1, Москва, 123001 Россия

\*E-mail: [irina.abramova@inafr.ru](mailto:irina.abramova@inafr.ru)

\*\*E-mail: [sharova.inafr@gmail.com](mailto:sharova.inafr@gmail.com)

Поступила в редакцию 15.05.2023 г.

После доработки 22.05.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

В статье анализируется ресурсный потенциал Африки с точки зрения обеспечения перехода мировой экономики к зеленой энергетике и определяются геостратегические риски, связанные с этим переходом. Авторы приходят к выводу, что африканские страны на сегодняшний день обладают существенными запасами металлов, необходимых для зеленого перехода. При этом они являются мировыми лидерами по запасам и производству бокситов, кобальта, хрома, платиноидов и тантала. В существенных количествах имеются также медь, литий, цинковые и никелевые руды. Все остальные критически важные для зеленой энергетике металлы также присутствуют на континенте. Основными поставщиками германия на мировые рынки длительное время были Намибия и ДРК. Значительные запасы редкоземельных металлов (иттрия) есть в Нигерии, Марокко и Египте, кадмия – в Намибии и ДРК, галлия – в Гвинее. Переход к зеленым технологиям теоретически может улучшить положение тех африканских стран, которые обладают высокотехнологичными материалами, за счет резкого роста спроса и цен на соответствующие товары. В реальности же они будут подвергаться жесточайшему давлению западных ТНК с использованием всего арсенала колониальных инструментов для создания благоприятных условий по приобретению последними данных видов материалов с наименьшими издержками. По мнению авторов, если реализуются стратегии Запада в отношении энергоперехода и климата, то в наибольшей степени это бремя будут нести те страны, которые исторически менее остальных участвовали в истощении традиционных источников энергии и загрязнении окружающей среды – самые бедные страны мира, в наибольшем количестве, страны Африки. Проталкиваемая Западом схема навсегда закроет им путь к прорывному экономическому развитию. Отсталость будет консервироваться технологически. России пытаются уготовить ту же участь.

*Ключевые слова:* Африка, ресурсный потенциал, зеленая энергетика, геостратегические риски, критически важные металлы, возобновляемые источники энергии

DOI: 10.31857/S0016777023050027, EDN: WETDLJ

### ВВЕДЕНИЕ

Современный мир находится на этапе глубочайшей экономической, политической и социальной трансформации. Старая модель мирового развития, отвечающая интересам узкой группы западных государств во главе с США, не в состоянии обеспечить ни устойчивый рост мирового хозяйства, ни баланс интересов стран и народов, ни политическую и военную стабильность в мире. Сегодня никто уже не сомневается, что современный Восток и Юг (а это не только Китай или Индия, но и множество других стран, в том числе азиатских, африканских и латиноамериканских) превратились в производителей основной части ресурсов и товаров, в особенности “базисных”, то есть тех, без которых масштабное реальное производство ни в одной части мира, в том числе в разви-

тых странах, попросту невозможно. Более того, реальный (а не виртуальный) процесс расширенного воспроизводства без этих ресурсов и товаров крайне затруднен.

Но и экономическая роль Запада, особенно на передовых направлениях, еще далеко не исчерпана. “Золотой миллиард” пытается сохранить свои позиции и привычный образ жизни, используя надстроечные элементы, а именно те рычаги влияния, которые остались у него в руках – военные, финансовые, административно-управленческие, информационные, научные, культурные и ценностные (Абрамова, Фитуни, 2022). И в экономической сфере развитие государства все еще сохраняют важнейший ресурс – научно-технологическое превосходство. Кроме того, не обладая первенством в минерально-сырьевой и топлив-

ной сферах, они формируют такую модель экономического развития, при которой *наличие* природных богатств само по себе — не главное, а вот возможность *управления* этими богатствами дает новые колоссальные преимущества для сохранения своего экономического и политического превосходства.

Одним из важнейших рычагов манипулирования и очередного перераспределения мировых ресурсов в пользу западных стран стал проект “перехода к зеленой, или возобновляемой энергетике”. Сам по себе проект выглядит вполне гуманным и отвечающим интересам человечества, поскольку, по мнению его авторов, уменьшает выброс парниковых газов и препятствует изменению климата.

Вот что пишут в документах ООН на эту тему: “Возобновляемая энергия — это энергия, получаемая из природных источников, которые пополняются со скоростью, превышающей скорость ее потребления. Примерами таких постоянно пополняемых источников являются солнечный свет и ветер. Возобновляемые источники могут обеспечить огромное количество энергии и окружают нас повсюду.

В противоположность им ископаемые виды топлива — уголь, нефть и газ — являются невозобновляемыми ресурсами, на формирование которых уходят сотни миллионов лет. При сжигании ископаемых видов топлива для производства энергии происходят выбросы вредных парниковых газов, таких как углекислый газ.

Получение энергии из возобновляемых источников энергии (ВИЭ) сопряжено с гораздо меньшими выбросами, чем сжигание ископаемого топлива. Переход от ископаемых видов топлива, на которые в настоящее время приходится львиная доля выбросов, к возобновляемым источникам имеет ключевое значение для преодоления климатического кризиса.

На сегодняшний день возобновляемые источники энергии являются более дешевой альтернативой в большинстве стран и создают в три раза больше рабочих мест, чем ископаемые виды топлива” (Что такое..., 2023).

Но так ли это на самом деле? Какова реальная цена перехода к зеленой энергетике? Какие страны должны заплатить за этот переход и кто будет его основным выгодоприобретателем? Что скрывается за термином “зеленая энергетика” и сможет ли она обеспечить мировое население дешевой электроэнергией? Какие политические и экономические риски связаны с энергопереходом? На эти и другие вопросы авторы статьи ответят на примере Африканского континента — региона, где проблема обеспечения населения дешевой энергией весьма далека от решения.

## НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ ПЕРЕХОДА К ЗЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ: АФРИКАНСКИЙ РАКУРС

По определению экспертов ООН, к возобновляемым источникам энергии относятся *солнечная энергия, энергия ветра, геотермальная энергия*, получаемая из геотермальных резервуаров посредством бурения скважин или иными способами, *гидроэнергия* и *энергия океана*<sup>1</sup>. При этом доля возобновляемых источников энергии в мировом производстве электроэнергии должна увеличиться к 2030 г. с нынешних 29 до 60% (Пять способов..., 2023).

Генеральный секретарь ООН Антониу Гуттериш описывает пять важнейших действий, которым мир должен уделить первоочередное внимание на данном этапе, чтобы преобразовать энергетические системы и ускорить переход на возобновляемые источники энергии, “потому что без возобновляемых источников энергии не может быть будущего”.

### *1. Сделать технологии использования возобновляемых источников энергии глобальным общественным благом*

Для того чтобы технологии использования возобновляемых источников энергии стали глобальным общественным благом, то есть стали доступными для всех, а не только для обеспеченных слоев населения, необходимо устранить препятствия на пути к обмену знаниями и передаче технологий, включая барьеры в области прав интеллектуальной собственности.

### *2. Улучшение глобального доступа к компонентам и сырью*

Надежные поставки компонентов и сырья для использования возобновляемых источников энергии играют крайне важную роль. Ключевое значение будет иметь более широкий доступ ко всем основным компонентам и материалам, начиная с полезных ископаемых, необходимых для создания ветряных турбин и электрических сетей, и заканчивая электромобилями.

### *3. Уравнять условия для применения технологий, основанных на возобновляемых источниках энергии*

Глобальное сотрудничество и координация имеют решающее значение, однако необходимо как можно скорее реформировать внутренние по-

<sup>1</sup> Для получения энергии океана применяются технологии, основанные на использовании кинетической и тепловой энергии морской воды — например, волн или течений — в целях производства электричества или тепла. Данные технологии находятся на ранней стадии разработки.

литические механизмы, чтобы упорядочить и ускорить реализацию проектов по возобновляемым источникам энергии и стимулировать инвестиции по линии частного сектора... Необходимо разработать стратегии и процедуры снижения рыночного риска и создания условий и стимулов для инвестиций, в том числе путем оптимизации процессов планирования, выдачи разрешений и регулирования, а также путем принятия мер по предотвращению возникновения узких мест и бюрократических проблем. Это может предусматривать выделение участков для крупномасштабного строительства в специальных зонах использования возобновляемых источников энергии.

#### *4. Переключение энергетических субсидий с ископаемых видов топлива на возобновляемые источники энергии*

Субсидии на ископаемые виды топлива являются одним из самых больших финансовых барьеров, препятствующих переходу на возобновляемые источники энергии во всем мире. По утверждению Международного валютного фонда (МВФ), только в 2020 г. на субсидирование отрасли ископаемого топлива было потрачено около 5.9 трлн долл. США, в том числе в форме прямых субсидий и налоговых льгот и в связи с нанесением ущерба здоровью населения и окружающей среде, который не был учтен в стоимости ископаемых видов топлива. Это примерно соответствует 11 млрд долл. США в день (Пять способов..., 2023).

Предоставление субсидий на ископаемые виды топлива является одновременно неэффективным и несправедливым. По данным МВФ, в развивающихся странах около половины государственных ресурсов, расходуемых на поддержание потребления ископаемого топлива, приносят в год 20% наиболее обеспеченного населения.

#### *5. Утроить инвестиции в возобновляемые источники энергии*

До 2030 г. в возобновляемые источники энергии, включая технологии и инфраструктуру, необходимо инвестировать не менее 4 трлн долл. США в год, с тем чтобы к 2050 г. мы смогли достичь чистого нулевого уровня выбросов (Пять способов..., 2023).

Для авторов данной статьи наиболее интересны два вопроса: какая роль отводится Африканскому континенту в стратегии зеленого перехода, в том числе в реализации вышеперечисленных пяти пунктов, и как переход к возобновляемым источникам энергии скажется на социально-экономическом развитии африканских государств?

Для ответа на эти вопросы, прежде всего, необходимо понять, какие металлы и минералы критически необходимы для зеленой энергетики.

## АФРИКАНСКИЕ РЕСУРСЫ И ИХ РОЛЬ В ЗЕЛЕНОМ ПЕРЕХОДЕ

По данным Международного института устойчивого развития, для производства солнечных батарей необходимы алюминий, кадмий, медь, галлий, германий, индий, железо, свинец, никель, селен, кремний, серебро, теллур, цинк, олово и тантал. В свою очередь, для ветровой энергетики критически важны алюминий, хром, кобальт, медь, железо, свинец, магний, молибден, редкоземельные металлы и цинк. Что касается производства электромобилей, то оно невозможно без алюминия, кобальта, меди, графита, железа, свинца, лития, марганца, никеля, редкоземельных металлов, кремния, платиноидов и титана (Church, Crawford, 2018).

Африка — континент, чрезвычайно богатый почти всеми металлами из вышеперечисленного списка, а по некоторым позициям отдельные африканские страны занимают ведущее место в мире.

Начнем с **бокситов** — основного сырья для производства алюминия. Общие запасы бокситов в мире составляют от 55 до 75 млрд т (U.S. Geological..., 2022; Guinea..., 2023).

Из них 26.4% находятся в небольшом африканском государстве — Гвинее. Гвинейские бокситовые руды — самые богатые по содержанию металла (40–55%). Полезное содержание в рудах следующих за Гвинеей стран — Ямайки и Австралии — 37 и 36% соответственно. В 2020 г. производство алюминиевого сырья в Гвинее достигло 87.7 млн т (22.4% мирового производства), из них почти все сырье (86 млн т) было экспортировано. Гвинея — второй после Австралии экспортер бокситов в мире. Неслучайно любая политическая или экономическая нестабильность в этой стране серьезно влияет на мировой рынок алюминия.

Вспомним военный переворот в Гвинее, который произошел 5 сентября 2021 г. Событие серьезно встряхнуло рынок алюминия, в том числе российский, так как 20% всех мировых производителей алюминия используют бокситы из этой страны. Потребности глиноземных заводов “Русала” обеспечиваются на 80% поставками с бокситодобывающих активов группы. В Гвинее на компанию приходится половина добычи бокситов — 7.3 из 14.8 млн т по итогам 2020 г.

Ситуация в Гвинее увеличила риски не только для российской, но и для глобальной алюминиевой отрасли. После этих событий фьючерсы на алюминий подорожали до максимума с мая 2011 г. и превысили отметку в 2775 долл. США за т (Кузнецов, 2021). Доля Гвиней в поставках сырья для Китая — крупнейшего в мире производителя алюминия — составляет 50%, “Русала” — крупнейшего производителя алюминия за пределами Китая — 45% (Зайнуллин, 2021). Иными словами, политический переворот в небольшой африкан-

**Таблица 1.** Производство бокситов в странах Африки (метрические тонны)

Страны/годы	2016	2017	2018	2019	2020
Кот-д'Ивуар	0	0	0	0	272295
Гана	1146676	1476366	1011302	1116334	1162086
Гвинея	32423932	51701564	59573707	70173326	87766199
Мозамбик	1451	3182	9912	8024	6491
Сьерра-Леоне	1368531	1787716	1938461	1883863	1342139
Танзания	73	12	7	0	25995
Мир	289279972	311872986	337346596	363465895	379021701

Примечание. По данным (Reichl, Schatz, 2022).

**Таблица 2.** Производство хрома в странах Африки (метрические тонны)

Страны/годы	2016	2017	2018	2019	2020
ЮАР	6254600	7073400	7524700	7384000	5442500
Зимбабве	128200	309980	402600	720330	572460
Мадагаскар	52800	102000	53500	37300	6100
Судан	1850	15360	12960	5950	4300
Мир	12823519	14221063	15363744	15920356	14964982

Примечание. По данным (Reichl, Schatz, 2022).

ской стране нарушил стабильность мирового рынка алюминия и в значительной мере повлиял на успешную реализацию проекта перехода к “зеленой энергетике”. Такая зависимость данного проекта от африканской составляющей, с одной стороны, демонстрирует его уязвимость в части доступа к критически важным ресурсам, а с другой, открывает возможности оказывать прямое давление на руководство той или иной страны для решения своих конкретных задач. И России в этой ситуации нельзя передавать пальму первенства Западу, поскольку в условиях санкций необходимо обеспечить устойчивость поставок гвинейских бокситов для алюминиевого производства РФ.

Так, в 2021 г. порядка половины потребностей “Русала” в бокситах было удовлетворено за счет поставок из Гвинеи с двух основных месторождений: Диан-Диан и Киндия. После начала СВО правительство Австралии запретило экспорт бокситов в Россию, а компания “Рио Тинто” по требованию властей взяла под свой полный контроль глиноземный завод “Квинзлэнд Элуминэ”, в котором российской компании принадлежит 20% (“Русал”..., 2022). В этих условиях значение поставок алюминиевого сырья из Гвинеи существенно возросло, а австралийское сырье было компенсировано китайским. Пример Гвинеи показывает, насколько зависим мировой рынок металлов, в данном случае речь идет об алюминии, от ситуации в отдельно взятой африканской стране.

Важнейшим металлом, необходимым для производства ветровых установок, наряду с алюминием является хром. В мировом производстве феррохромитов африканским странам принадлежит почти 50%. Главными продуцентами хромитов на континенте являются ЮАР и Зимбабве (более 90%). Месторождения хрома обнаружены также в Судане, на Мадагаскаре и в относительно небольших количествах в Кении, Сьерра-Леоне и Танзании.

Абсолютным мировым лидером по производству хрома остается ЮАР. В 2018 г. ее доля в производстве этого металла достигала почти 50%. Даже в ковидном 2020 г., когда в ЮАР были введены очень строгие ограничения и производство хрома сократилось на 27%, удельный вес страны в производстве хрома не опускался ниже 36% от мирового.

Хром добывают в ЮАР девять крупных компаний на 15 месторождениях. Почти все месторождения сосредоточены на Бушвельдском комплексе. Наиболее крупным производителем хромитов в ЮАР является корпорация “Икстрата”. Ее дочерняя компания, в которой ей принадлежит 79.5% капитала, “Икстрата-Мераф Кроум”, ведет эксплуатацию месторождений с общим объемом запасов хромитовых руд в размере 52 млн т (содержание в руде металла от 30 до 35%). “Икстрата” добывает более 4 млн т в год. Компания “Саманкор”, 70% капитала которой принадлежит “Интернешнл Минерал Ресорсис”, добывает 3 млн т руды, 80% которой идет на предприятия компании по

производству феррохрома, а 700 тыс. т экспортируется.

Компания “Херник Феррохром” (51% капитала принадлежит Мицубиси) добывает 1.5 млн т. В ЮАР добывают хром английские, австралийские, индийские, китайские и другие компании. Созданная “Норильск-Никелем” “Норильск-Никель Африка” добывает 528 тыс. т хромитовых руд (доказанные и возможные запасы месторождения составляют 2.9 млн т) (Корендясов, 2012).

Обратимся теперь к такому металлу, как **кобальт**. Этот металл критически необходим как для ветровой энергетики, так и для производства электромобилей. Кроме того, он применяется как катализатор химических реакций в нефтехимии и в промышленности полимеров. Также используется в качестве добавки к сталям, улучшая их свойства, в авиационной, космической и радиотехнической промышленности. Кобальт обладает высокими магнитными свойствами. Его получают в основном из никелевых руд, обрабатывая их растворами серной кислоты или аммиака. Также используются методы пирометаллургии (за исключением производства в Марокко и в Демократической Республике Конго (ДРК), большая часть кобальта добывается как побочный продукт меди или никеля).

По данным Геологической службы США и Организационного комитета всемирного горного конгресса, в Африке есть ряд стран, где могут располагаться запасы, а также осуществляться добыча и производство кобальта: ДРК, Ботсвана, Буркина-Фасо, Замбия, Зимбабве, Кот-д’Ивуар, Мадагаскар, Марокко, Намибия, Судан, Танзания, ЮАР.

Среди стран Африки крупнейшие залежи кобальта расположены в ДРК (оцениваются в 3.6 млн т, или 70% мировых запасов). В этой связи ДРК – крупнейший производитель кобальта в мире. Объем мирового производства на 2020 г. составил 129.1 тыс. т, из них в ДРК – 86.6 тыс. т (67.1% от общемирового показателя). Основные горнодобывающие предприятия ДРК находятся в провинции Катанга, в частности, проекты Мутанда, Камото, Этуаль и Руаши. В данной отрасли на территории страны работают компании “Гленкор” (международная компания со штаб-квартирой в Швейцарии и американскими учредителями Маркусом Ричем и Пинкусом Грином, которая покупает и перепродает сырьевые товары по всему миру) и “Жекамин” (конголезская компания, основанная в 1967 г. как государственная, но переданная в 2010 г. в частные руки. К управлению компанией были привлечены французские и канадские специалисты. “Жекамин” получает инвестирование от Всемирного банка, а также от других коммерческих банков, включая китайские). Весьма примечательно, что добыча кобальта

в ДРК ведется в значительной степени кустарным способом, в том числе с применением детского труда, и часто контролируется незаконными вооруженными формированиями. Это очень удобно для западных покупателей, которые по дешевке скупают сырье у местных бандитов. ДРК – богатейшая по многим видам ресурсов страна, в том числе по критически важным для зеленой энергетики металлам, остается одной из беднейших стран мира. Теоретически, рост спроса на критически важные для зеленой энергетики металлы, в том числе на кобальт, мог бы послужить важным стимулом для развития конголезской экономики. Но, в реальности, западные ТНК, контролирующие добычу этого металла, вовсе не заинтересованы в таком сценарии. Гораздо выгоднее скупать по дешевке металл у бандитских формирований в условиях военной нестабильности или коррумпировать руководство конголезских компаний по добычке полезных ископаемых или даже политическое руководство африканских стран, как это было с президентом ДРК Жозефом Кабилой и исполнителем директором “Жекамин” Альбертом Юмой, уволенным со своего поста в 2021 г. новым президентом ДРК Феликсом Чисекеди. Это еще раз подтверждает наш тезис о том, что важно не кто владеет ресурсами, а кто ими управляет. Весьма примечательно, что пытающиеся сохранить мировую гегемонию США на 70% зависят от поставок кобальта из ДРК.

Сегодня в ДРК планируется создание государственной компании, контролирующей кустарную добычу кобальта в стране (30% от всего производства кобальта в ДРК), что вызывает значительное сопротивление со стороны западных ТНК. Однако ДРК не желает более довольствоваться сугубо ролью поставщика сырья. В настоящее время правительство изыскивает возможности обеспечить производство конечного продукта (товаров с высокой добавленной стоимостью) внутри страны. Первым шагом на пути к этому станет создание экспериментального завода по производству литий-ионных аккумуляторов с применением кобальта. Запуск завода планируется на конец 2023 г.

Еще один важнейший для зеленой энергетики металл – **медь**. Она добывается путем разработки вкрапленных руд. В основном медь производится пирометаллургическим способом, с помощью высоких температур и плавки, а также гидрометаллургическим способом – с помощью растворения руды в серной кислоте с последующим выделением меди.

По данным Геологической службы США и Организационного комитета всемирного горного конгресса, в Африке есть ряд стран, где могут располагаться запасы, а также осуществляться добыча и производство меди: Алжир, Ангола, Ботсва-

**Таблица 3.** Производство кобальта в странах Африки (метрические тонны)

Страны/годы	2016	2017	2018	2019	2020
Ботсвана	281	0	0	0	0
ДРК	69038	82461	111713	78664	86591
Замбия	5276	2649	1766	1271	367
Зимбабве	409	445	403	402	956
Мадагаскар	3654	2967	2887	2947	963
Марокко	2081	1924	1806	2397	2416
ЮАР	1101	1065	1007	1027	897
Мир	130839	138692	158317	124968	129110

Примечание. По данным (Reichl, Schatz, 2022).

**Таблица 4.** Производство меди в странах Африки (метрические тонны)

Страны/годы	2016	2017	2018	2019	2020
Ботсвана	13120	1239	1462	0	0
ДРК	1023687	1094638	1239059	1461124	1712964
Замбия	774290	799329	857847	796430	882061
Зимбабве	9101	8839	9077	8731	7933
Мавритания	32818	28791	28137	29620	28491
Марокко	31810	35420	32430	30720	31750
Намибия	16391	15466	15177	14940	15741
Республика Конго	0	15979	18018	18760	10300
Танзания	17400	15800	10000	14187	11700
Эритрея	25300	7900	17300	16008	21725
ЮАР	65257	65532	46900	52501	29068
Мир	20509627	20083860	20702409	20650346	20788363

Примечание. По данным (Reichl, Schatz, 2022).

на, Буркина-Фасо, Гана, ДРК, Египет, Замбия, Зимбабве, Республика Конго, Кот-д'Ивуар, Мавритания, Марокко, Намибия, Сомали, Танзания, Эритрея, Эфиопия, ЮАР.

Крупнейшим в Африке производителем меди является все та же Демократическая Республика Конго. Объем мирового производства этого металла на 2020 г. составил 21 млн т, из них в ДРК было произведено 1.7 млн т (более 8% от мировой добычи). Основные запасы меди в стране сосредоточены в так называемом Медном поясе Катанга. Главные месторождения – Кипуши, Камото, Мусонои, Руве, Тенке-Фунгуруме, Мусоши. Вторым по значимости африканским производителем меди является Замбия, где в 2020 г. было добыто 882 тыс. т металла (около 4%) на рудниках Нкана, Нчанга, Рон-Антелоп, Чибулума, Чингола, Муфулира. Среднее содержание меди в добываемой руде 2.9% (около 2.4% в Замбии и 4% в Демократической Республике Конго) (Brand, 2023). Производятся медно-сульфидные, медно-кобальтовые сульфидные и окисленные, а также

смешанные концентраты. Весьма примечательно, что если в большой по численности населения ДРК (112 млн в 2022 г.) Запад активно применяет метод “разделяй и властвуй”, то в относительно небольшой Замбии (19 млн жителей) используется метод “пряника”. Именно эта страна стала африканским соучредителем так называемого “Саммита демократии”, организованного по инициативе США в 2023 г.

Еще один важный металл, используемый при изготовлении аккумуляторов, – **кадмий**. Низкая температура плавления позволяет использовать кадмий для создания твердых припоев. Кадмий хорошо улавливает нейтроны, поэтому широко применяется в атомной энергетике.

В чистом виде в природе кадмий не встречается. Известно всего лишь шесть кадмиевых минералов, которые крайне редки. По данным Геологической службы США, в Африке есть ряд стран, где могут располагаться запасы, а также осуществляться добыча и производство кадмия: ДРК, Замбия, Намибия, ЮАР.

**Таблица 5.** Производство цинка в странах Африки (метрические тонны)

Страны/годы	2016	2017	2018	2019	2020
Алжир	330	350	500	500	1000
Буркина-Фасо	80950	91530	99162	106680	78990
ДРК	12587	12337	1047	1607	15305
Марокко	43020	51700	57700	43570	35810
Нигерия	13400	22130	26920	23310	26880
Намибия	132470	131920	118310	124630	62260
Республика Конго	520	4270	460	4830	1100
Эритрея	40900	95400	125000	121260	121930
ЮАР	26695	30778	28129	125157	160816
Мир	12364799	11869887	12211922	13085996	12608299

Примечание. По данным (Reichl, Schatz, 2022).

Важно отметить, что кадмий в основном получают из цинковых руд, в частности из минерала сфалерита, в котором содержание кадмия может достигать до 5%. Африка обладает существенными залежами цинковых руд (около 10% от общемировых).

Увеличение производства цинка в Африке тесно связано с переносом грязных предприятий из других регионов. Например, на плавильный завод в Цумеб (Намибия) свозят руду из Латинской Америки, Болгарии и соседних африканских стран, а конечный продукт экспортируют в Европу (Energiewirtschaft..., 2023).

**Германий** широко используется при производстве солнечных батарей, а также в инфракрасной и волоконной оптике благодаря своим оптическим свойствам. Металл является важным компонентом в процессах полимеризации ПЭТ-пластиков.

В природе германий встречается в виде примесей к полиметаллическим и вольфрамовым рудам, а также в силикатах. Германием богаты сфалериты и сульфосоли. В промышленных масштабах данный металл в основном добывается из цинковых руд (табл. 3).

Информация по добыче и залежам германия в африканских странах ограничена. Во всем мире металл добывается в незначительных количествах (около 100 т в год). По данным Геологической службы США, в Африке есть ряд стран, где могут располагаться запасы, а также осуществляться добыча и производство германия: ДРК, Намибия и ЮАР.

**Литий** используется для производства литий-ионных батарей, специального стекла и керамики, катализаторов и консистентных смазок. Литий добывают из силикатов и высококонцентрированных растворов солей (рапы) при помощи химических реакций и электролиза.

В настоящее время литий является одним из самых востребованных минералов в мире. С 2000 по 2020 гг. его мировое производство увеличилось на 582%. Это связано с использованием литий-ионных батарей для электромобилей и другого электронного оборудования. Считается, что в будущем спрос на этот металл будут способствовать применению лития для аккумуляторных батарей, накопителей энергии, портативной электроники, электрических мобильных устройств. Прогнозируется рост ежегодного спроса на литий от 9.7 до 20%. Только за 2021–2022 гг. спрос на него вырос на 83.2% (Reichl, Schatz, 2022). Исходное сырье для лития – сподумен, циннвальдит, лепидолит, амблигонит и петалит, а также солевые растворы. Извлечение лития из петалита является наиболее экономически целесообразным, так как этот минерал отличается относительно высоким содержанием лития и может использоваться для извлечения элемента в виде таких соединений, как карбонат лития, хлорид лития и фторид лития.

По данным Геологической службы США и Организационного комитета всемирного горного конгресса, в 2020 г. основными производителями лития в мире были пять стран: Австралия (47.6% всего производства), Чили (26.8%), Китай (15.5%), Аргентина (6.8%) и Бразилия (2%). На все остальные страны приходилось всего 1.3% производства этого металла (Reichl, Schatz, 2022).

Страны Африки вплоть до начала 2020-х годов не играли серьезной роли в общемировом производстве лития (табл. 6).

Однако по данным Геологической службы США, в Африке есть ряд стран, где могут располагаться существенные запасы, а также осуществляться добыча и производство лития: ДРК, Зимбабве, Мали, Мозамбик, Намибия, Нигерия, Танзания, Уганда, ЮАР. Отличительная особенность Африканского континента – недоразведанность природных богатств. Практически еже-

**Таблица 6.** Производство лития в странах Африки (метрические тонны)

Страны/годы	2016	2017	2018	2019	2020
Зимбабве	2030	1850	3160	2650	860
Намибия	0	0	600	0	0
Нигерия	0	0	50	10	0
Мир	83667	162333	198464	189180	185850

Примечание. По данным (Reichl, Schatz, 2022).

годно в Африке открываются новые месторождения различных видов полезных ископаемых, в том числе критически важных металлов.

Существенные запасы лития, в том числе петалита, были обнаружены в Зимбабве (220 тыс. т – 1% от мировых запасов) (U.S. Geological... 2022). Там находится одно из крупнейших месторождений лития Бикита (30 тыс. т). В недавнем прошлом Зимбабве запретила экспорт необработанного лития-сырца (необогащенного лития) или литийсодержащих руд со своих рудников без письменного разрешения министра. Цель этого запрета – собственное производство литиевых батарей внутри страны. Ожидается, что при сохраняющемся высоком международном спросе Зимбабве превратится в крупного экспортера лития. Правительство страны строит амбициозные планы, надеясь со временем удовлетворять до 20% мирового спроса на этот металл.

В 2022 г. в Намибии было обнаружено одно из крупнейших месторождений лития в мире. Сподумен, литийсодержащий материал, был найден в 11 км от рудника Уйс Тин Майн, на лицензионном участке 129 (Energiewirtschaft..., 2023).

В этой связи РФ, наряду с разработкой собственных месторождений лития, не следует упускать возможности, которые предоставляет Африка. И Зимбабве, и Намибия – дружественные России страны. Еще в январе 2019 г. президент Зимбабве Эмерсон Мнангава приезжал в Москву и вел переговоры по поводу привлечения российских инвестиций в производство лития. Этот же вопрос обсуждался на первом саммите Россия–Африка в Сочи. Аналогичные предложения высказывает и Намибия. Необходимо, на наш взгляд, внимательно изучить данный вопрос с учетом себестоимости производства лития в этих странах, а также возможных рисков и стратегических преимуществ, открывающихся для РФ в этой сфере с учетом СВО.

**Ниобий (Колумбий)** применяется в ракетостроении, авиационной и космической технике, радиотехнике, электронике, атомной энергетике и химическом аппаратостроении. Кроме того, он резко повышает эффективность солнечных батарей. Австралийские исследователи сообщают, что благодаря использованию ниобия им удалось

повысить КПД третьего поколения солнечных батарей по крайней мере на 25%. Полупроводники в новых сенсibilизированных красителем фотоэлектрических элементах (DSC), разработанных в Королевском Мельбурнском Технологическом Институте, сделаны из ниобия (Nb) вместо традиционного диоксида титана (TiO<sub>2</sub>). Пятиокись ниобия (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), которая послужила основой для новых солнечных батарей, является недорогим, химически стабильным и экологически чистым материалом (Новосты..., 2023). Ниобий получают из рудных концентратов в три стадии: вскрытие концентрата, разделение ниобия и тантала и получение их чистых химических соединений, восстановление и рафинирование металлического ниобия и его сплавов. Ценность представляют ниобиевые руды – природные минеральные образования, содержащие ниобий (известно свыше 100 минералов).

В Африке есть ряд стран, где могут располагаться существенные запасы, а также осуществляться добыча и производство ниобия: Бурунди, ДРК, Замбия, Малави, Мозамбик, Намибия, Нигер, Нигерия, Руанда, Танзания, Уганда, Эфиопия.

Несмотря на то что производство ниобия пока незначительно, его разработка активно ведется западными и китайскими корпорациями.

**Тантал** используется в авиационной и космической отраслях, автомобильной электронике, электронной технике и в медицине, в частности при производстве хирургических штифтов и пластин. Этот металл – важный компонент для производства электромобилей. Тантал получают из рудных концентратов и шлаков с помощью сложного химического процесса, включающего в себя обработку концентрата кислотами. Ценность представляют танталовые руды – природные минеральные образования, содержащие тантал в таких соединениях и концентрациях, при которых их промышленное использование технически возможно и экономически целесообразно.

По данным Геологической службы США и Организационного комитета всемирного горного конгресса, в Африке есть ряд стран, где могут располагаться запасы, а также осуществляться добыча и производство тантала: Бурунди, ДРК, Мала-

**Таблица 7.** Производство ниобия в странах Африки (метрические тонны)

Страны/годы	2016	2017	2018	2019	2020
Бурунди	8	18	5	5	5
ДРК	797	717	607	433	565
Мозамбик	7	10	12	11	17
Нигерия	104	122	181	170	80
Руанда	190	260	245	205	160
Уганда	4	3	2	2	52
Эфиопия	28	25	28	14	11
Мир	88564	91980	109023	135539	93509

Примечание. По данным (Reichl, Schatz, 2022).

**Таблица 8.** Производство тантала в странах Африки (метрические тонны)

Страны	2016	2017	2018	2019	2020
Бурунди	11	26	8	8	7
ДРК	845	761	644	460	600
Мозамбик	41	57	66	59	94
Нигерия	66	480	230	120	100
Руанда	290	395	380	315	240
Эфиопия	101	90	104	50	41
Мир	1175	2263	2006	1611	1682

Примечание. По данным (Reichl, Schatz, 2022).

ви, Мозамбик, Намибия, Нигерия, Руанда, Уганда, Эфиопия.

ДРК – крупнейший производитель тантала. Объем мирового производства на 2020 г. составил 1682 т, из них в ДРК – 600 т (около 36% от общемирового показателя). В 2020 г. на страны Африки приходилось более 64% мирового производства тантала.

Важнейшую роль при переходе к зеленой энергетике играют также платина и палладий. По этим видам металлов ведущая роль принадлежит двум африканским странам – ЮАР и Зимбабве.

Платина очень важна для использования протонообменной мембраны (РЕМ), которая жизненно необходима для получения приложений с нулевым уровнем выбросов водорода. Эта технология используется в электромобилях в виде водородных топливных элементов, а также для производства самого зеленого водорода в виде катализаторов. По оценкам, к 2030 г. годовой спрос на зеленый водород составит около 30 млн метрических т, для чего потребуются около 250 ГВт катализаторов водорода. Поскольку платина является ключевой частью этих катализаторов, драгоценный металл будет в авангарде зеленой “водородной революции”.

Как видно из табл. 9, крупнейшим производителем платины в мире остается ЮАР. На ее долю

приходится около 70% мирового производства этого металла. В Зимбабве (8% мирового производства) ведется разработка крупнейшего месторождения платины Дарвендейл. Ранее месторождение принадлежало южноафриканской “Импала Платинум Холдингз Лтд.”, однако в 2006 г. правительство Роберта Мугабе отдало его российским инвесторам – компании “Вихолдинг”. Наряду с платиной оно включает запасы палладия, родия, золота, никеля и меди. Ожидалось, что промышленное производство начнется на месторождении в 2023 г. На пике своей мощности фабрика будет производить в год 860 тыс. унций металлов платиновой группы, а также золота. Общая стоимость проекта – 3 млрд долл. США (Российский..., 2022). К сожалению, из-за санкций и невозможности привлечь инвесторов в июне 2022 г. “Вихолдинг” передала свою 50%-ную долю в платиновом месторождении Дарвендейл в Зимбабве госкомпания “Кувимба Майнинг Хаус Лтд.”.

Палладий, вероятно, также сыграет важную роль в зеленой водородной революции, но, как предполагают инвесторы, значительно меньшую, чем платина, из-за его значительно более высокой цены. Однако это не расстраивает производителей, так как палладий очень хорошо работает с водородом, ведь он может поглощать этот эле-

**Таблица 9.** Производство платины в странах Африки (метрические тонны)

Страны/годы	2016	2017	2018	2019	2020
Зимбабве	15 110	14 257	14 703	13 857	15 004
ЮАР	133 241	132 500	137 053	132 989	111 993
Мир	189 542	184 641	189 221	185 502	165 619

Примечание. По данным (Reichl, Schatz, 2022).

**Таблица 10.** Производство палладия в странах Африки (метрические тонны)

Страны/годы	2016	2017	2018	2019	2020
Зимбабве	12 222	11 822	12 094	11 640	12 890
ЮАР	76 273	80 713	80 629	80 684	66 264
Мир	212 129	204 633	223 387	225 404	199 902

Примечание. По данным (Reichl, Schatz, 2022).

мент, а также обладает каталитическими свойствами.

Таким образом, палладий можно использовать для хранения и очистки водорода, детекторов и топливных элементов, что также делает его ключевым компонентом катализаторов. Это может привести к увеличению спроса на палладий как со стороны производителей автомобильных катализаторов, так и производителей электромобилей и других поставщиков возобновляемой энергии. Напомним, что крупнейшим производителем палладия является Россия.

Таким образом, африканские страны на сегодняшний день обладают существенными запасами металлов, необходимых для зеленого перехода. При этом они являются мировыми лидерами по запасам и производству бокситов, кобальта, хрома, платиноидов и тантала. В существенных количествах имеются также медь, литий, цинковые и никелевые руды. Все остальные критически важные для зеленой энергетики металлы также присутствуют на континенте. Основными поставщиками германия на мировые рынки длительное время были Намибия и ДРК. Значительные запасы редкоземельных металлов (иттрия) есть в Нигерии, Марокко и Египте, кадмия – в Намибии и ДРК, галлия – в Гвинее и т.д.

Более того, в Африке наблюдается бум геологоразведочных работ и постоянно открываются новые месторождения, в том числе, металлов, необходимых для “зеленого перехода”. В этих условиях роль Африканского континента в обеспечении этого перехода с точки зрения сырьевого компонента будет расти.

Следует также отметить, что на сегодняшний день можно выделить пять стран, обладающих наибольшими запасами минералов для зеленого перехода на Африканском континенте. Это – ДРК, ЮАР, Гвинея, Зимбабве и Намибия. Высо-

кая концентрация критически важных металлов в малом количестве африканских государств увеличивает геостратегические риски с точки зрения доступа к этим ресурсам “стран-интересантов”, так как конкурентная борьба между ними на ограниченных площадках принимает все более острые формы, а методы этой борьбы не всегда лежат в правовом поле. В этих условиях, с одной стороны, эти пять африканских стран могут обладать явными преимуществами и выиграть в процессе зеленого перехода. С другой стороны, их небольшое число позволяет при относительно небольших усилиях оказывать серьезное давление на руководство данных государств с целью присвоения их богатств. И попытки такого давления мы постоянно наблюдаем. Используется и хорошо известный нам механизм экономических санкций (Зимбабве), и развязывание вооруженных конфликтов (ДРК), и государственные перевороты (Гвинея) и протестные движения и так называемая “борьба с коррупцией” (ЮАР, Намибия). В этой ситуации РФ необходимо уделить особое внимание выстраиванию равноправных и взаимовыгодных отношений с этими государствами, поскольку это отвечает нашим общим интересам как стран-обладателей критически важных ресурсов, в том числе необходимых для “зеленой энергетики” и повышает конкурентные возможности России и стран Африки на мировом рынке сырья.

#### РЕШАЕТ ЛИ ЗЕЛЕНЫЙ ПЕРЕХОД ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ АФРИКИ?

На сегодняшний день Африка южнее Сахары (АЮС) по-прежнему остается наименее электрифицированным регионом мира. Согласно оценкам Всемирного Банка, в 2020 г. более 596 млн африканцев, или 51.8% всего населения не имели доступа к электроэнергии (Access..., 2023). Для

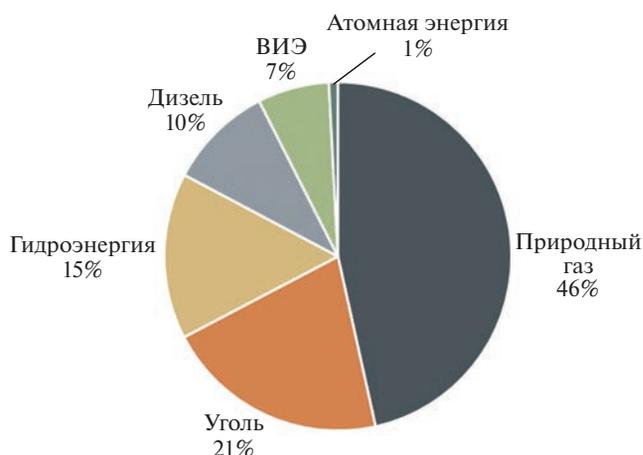
сравнения: в Центральной и Южной Америке этот показатель составляет 3.3%, в развивающихся странах Азии – 3.9%, на Ближнем Востоке – 7.7%. Именно в Африке расположены первые 20 стран с наименьшим доступом населения к электроэнергии в мире, а именно: Южный Судан (2.2% населения имело доступ в 2020 г.), Чад (11.1%), Бурунди (11.7%), Малави (14.9%), ЦАР (15.5%) и т.д. Подушевое потребление энергии в Африке, за исключением ЮАР, не превышает 180 кВт ч, в то время как в США этот показатель достигает 13000 кВт ч, в Европе – 6500 кВт ч (Light Up... 2023).

В 2016–2019 гг. наметилась положительная динамика в обеспечении доступа африканского населения к электроэнергии: в тот период более 35 млн человек ежегодно получали доступ, в 2010–2015 гг. средний показатель составлял чуть менее 25 млн человек в год. В отдельные периоды мы наблюдали превышение количества человек, получающих доступ ежегодно, над естественным приростом населения.

Однако мировой кризис, вызванный пандемией коронавирусной инфекции COVID-2019, во многом замедлил и развернул в противоположную сторону положительную тенденцию. Согласно последним оценкам Международного энергетического агентства (МЭА), количество людей во всем мире, не имеющих доступа к электроэнергии, увеличилось почти на 20 млн в 2022 г. и достигло 775 млн, впервые за последние 20 лет. Рост данного показателя произошел в основном за счет стран Африки южнее Сахары, где количество людей, не имеющих доступа к электроэнергии, вплотную приблизилось к своему пику 2013 г. (Cozzi, 2022). В отдельных странах уже наблюдается рост населения, не имеющего доступа к электричеству (наибольший рост ожидается в ДРК и на Мадагаскаре), в других – замедление темпов расширения доступа (например, в Мозамбике, Сенегале, Кении и Эфиопии, где был достигнут значительный прогресс до пандемии).

В сложившихся обстоятельствах мы можем говорить о том, что одна из целей устойчивого развития ООН, а именно обеспечение всеобщего доступа к недорогой, надежной, устойчивой и современной энергии к 2030 г., вряд ли будет достигнута в Африке. Для ее достижения ежегодно в Африке 90 млн новых потребителей должны получать доступ к электроэнергии, что в три раза больше допандемийных значений. Таким образом, еще до пандемии достижение указанной цели ставилось под сомнение, а в настоящее время ситуация еще более усугубилась, в основном из-за нехватки финансовых ресурсов и роста цен на топливо. Тем не менее, согласно прогнозам, в Гане, Кении и Руанде цель всеобщего доступа к электроэнергии будет достигнута в срок. Спрос на

Установленные мощности в Африке



Фиг. 1. Современная структура энергоснабжения в Африке (по Africa..., 2022).

электроэнергию в Африке будет расти, в среднем он увеличится в три раза в период 2020–2030 гг., чему будет способствовать рост населения, развитие экономики континента, процессы индустриализации и урбанизации.

Каким же образом необходимо решать энергетическую проблему в Африке? На сегодняшний день, как видно из фиг. 1, 77% электроэнергии в Африке вырабатывается за счет использования традиционных видов топлива. При этом именно природный газ играет доминирующую роль в энергобалансе Африки, и альтернативы ему на ближайшую перспективу просто нет. Очевидно, что отказ от традиционных видов энергии, как того требуют апологеты зеленой экономики (см. пункт 5 предложений А. Гуттериша), и сокращение инвестиций в разработку угольных, нефтяных и газовых месторождений, попросту приведет к энергетическому коллапсу в Африке. Вспомним постоянные протесты “экологов” в ЮАР, требующих закрыть ТЭЦ, работающие на угле, за счет которых вырабатывается более 60% всей электроэнергии в Южноафриканской Республике. Это уже привело к веерным отключениям электричества по всей стране. При этом сами инициаторы зеленого перехода – европейские страны – активно размораживали угольные проекты у себя, чтобы решить собственные энергетические проблемы. Налицо прямое лицемерие и политика двойных стандартов.

Весьма примечательно, что весомый вклад в обеспечение электроэнергией африканского населения могла бы внести ядерная энергетика. Для этого у африканцев есть все возможности, включая наличие урана. Но в настоящее время выработка ядерной энергии в коммерческих масштабах осуществляется только в ЮАР (АЭС “Коберг”

**Таблица 11.** Реализуемые в настоящее время электроэнергетические проекты в области генерации в Африке\*

Субрегион	Количество проектов, шт.			Мощность, МВт			Оценочная стоимость, млн долл. США
	всего	гидро	другие ВИЭ	всего	гидро	другие ВИЭ	
Восточная Африка	51	12	35	15 180.7	11 216	3078.7	24707
Западная Африка	28	2	19	6006	3500	1189	10968
Северная Африка	23	3	15	20 126	458	2997	47 379
Южная Африка	18	0	17	1588	0	1538	3131.7
Центральная Африка	19	8	10	10 401.5	8364	1675.5	23 833.5
Африка	139	25	96	53 302.2	23 538	10 478.2	110 019.2

Составлено авторами.

\*Здесь и далее авторы используют классификацию ООН для определения субрегионов Африки и входящих в них стран.

мощностью 1940 МВт). Госкорпорация “Росатом” строит АЭС “Эд-Дабаа” в Египте мощностью 4800 МВт, что сможет существенно нарастить долю атомной энергетики в энергобалансе Африки. Однако ядерная энергетика, по мнению авторов зеленого проекта, не относится к чистой энергетике.

Согласно нашим расчетам и оценкам, в 2020–2030 гг. в Африке в сфере генерации электроэнергии будет реализовано более 135 проектов суммарной мощностью более 50 тыс. МВт и общей стоимостью более 110 млрд долл. США. При этом и по количеству проектов, и по мощности проекты в области возобновляемой энергетики намного превосходят относящиеся к традиционной энергетике.

Из 139 проектов 121 реализуется в сфере возобновляемой энергетики, при этом только 25 – в сфере гидроэнергетики. Все эти проекты весьма дорогостоящие и требуют привлечения значительных финансовых средств и применения зарубежных технологий. Так, по данным компании Блумберг, в ближайшие 10 лет Африке понадобится более 700 млрд долл. для развития зеленой энергетики, включая добычу критически важных металлов (Sguazzin, 2023). Очевидно, что решить эту задачу за счет собственных финансовых ресурсов страны Африки не в состоянии. Таким образом, зеленый переход ведет к еще большей финансовой и технологической зависимости африканских государств от западных покровителей.

Это не означает, что Африка должна отказаться от использования преимуществ возобновляемой энергетики, тем более что она обладает существенным природным потенциалом для ее развития. Согласно оценкам Международного агентства по возобновляемому источникам энергии (IRENA), технический потенциал солнечной энергетики континента составляет 7900 ГВт, что является наибольшим показателем в мире, гидроэнергетики – 1753 ГВт, ветроэнергетики – 461 ГВт, также

в некоторых частях Африки имеется потенциал для развития геотермальной и современной биоэнергетики (Renewable... 2023). Вопрос заключается только в том, что Африка должна самостоятельно, а не по указке Запада, формировать свою энергетическую повестку в зависимости от социально-экономических приоритетов развития собственных государств и народов.

На Африканском континенте в ближайшем будущем (до 2030 г.) будет реализовано восемь мегапроектов в области электроэнергетики, мощность каждого из них превышает 2 тыс. МВт<sup>2</sup>. Два проекта в Египте (угольные станции Аль-Нууайс и Хамрауэйн) на данный момент отложены на неопределенный срок в связи с мировой пандемией коронавирусной инфекции. Большинство мегапроектов (пять из восьми, или пять из шести, если не считать угольные электростанции в Египте) относятся к гидроэнергетике.

Исходя из представленного анализа, можно выделить наиболее перспективные отрасли для российско-африканского сотрудничества в сфере электроэнергетики.

– В сфере генерации: реализация проектов в области гидроэнергетики (как крупные объекты, так и проекты в области малой гидроэнергетики, которые получают все большее распространение в Африке); в области возобновляемой энергетики (солнечные электростанции как фотоэлектрические, так и концентрирующего типа, ветровые электростанции, в Кении, Танзании и Эфиопии ведется активное освоение геотермальных источников энергии); в области атомной энергии (помимо Египта в практической плоскости над раз-

<sup>2</sup> ГЭС *Caculo Cabaça* в Анголе (2172 МВт); ГЭС *Batoka Gorge* на территории Замбии и Зимбабве (2400 МВт); ТЭС *Al Nowais* в Египте (2650 МВт); ГЭС *Mambila* в Нигерии (3050 МВт); АЭС “Эд-Дабаа” в Египте (4800 МВт); ГЭС *Inga III* в ДРК (4800 МВт); ГЭС “Хидасэ” в Эфиопии, или “Плотина великого возрождения Эфиопии” (6450 МВт); ТЭС *Hamrawein* в Египте (6600 МВт).

витиём атомной энергетики работают Гана, Кения, Марокко, Нигерия и Судан, а также Алжир, Тунис, Уганда и Замбия). Малые модульные реакторы (ММР) – современные ядерные реакторы относительно небольших размеров, меньшей мощности и с более низкими первоначальными затратами по сравнению с традиционными реакторами – могут стать оптимальным решением для африканских стран, энергосистемы которых зачастую характеризуются небольшой первоначальной мощностью.

– В сфере передачи и распределения электроэнергии: строительство кабельных и воздушных линий электропередачи различного напряжения и дальности, трансформаторных подстанций, поставки силовых трансформаторов и оборудования, распределительных устройств, систем защиты и автоматики.

– Внедрение современных технологий повышения эффективности энергосистем и технологий энергосбережения, инновационных решений в области распределенной энергетики, систем контроля и управления электроэнергетическими системами и объектами, систем контроля качества электроэнергии; реализация концепции интеллектуальных энергосистем, гибких сетей, цифровых подстанций и т.д.

Именно такой комплексный подход позволит наиболее успешно решить энергетическую проблему Африки.

На Российской энергетической неделе, которая прошла в октябре 2022 г. в Москве, Председатель Африканской энергетической палаты Энджей Аюк так ответил на вопрос корреспондента РИА Новости о зеленой энергетике, к переходу на которую призывает Африку Европа: “Европа не должна нам указывать, мы этому сопротивляемся, нам нужен справедливый и инклюзивный энергопереход” (Энджей... 2022). Эти слова полностью подтверждают выводы авторов этой статьи.

### КОМУ ВЫГОДЕН ЗЕЛЕНЫЙ ПЕРЕХОД?

Рассмотрев уникальные ресурсные возможности Африки для зеленого перехода, а также проанализировав потребности континента в обеспечении населения доступной энергией, определим, какая роль отводится Африке в зеленой повестке и кто больше всего от нее выигрывает.

Очевидно, что главными “выгодоприобретателями” проекта зеленого перехода становятся страны “золотого миллиарда”.

Сегодня эти страны с долей населения в 16% от мирового потребляют от 50 до 90% всех видов сырья, в то время как их производство на 85% расположено на Востоке и Юге. И, в первую очередь, как мы видим на примере Африканского континента, это касается добычи топлива и руд металлов.

При этом в рамках глобализации Запад перенес наиболее грязные виды производства в развивающиеся, в том числе африканские, страны, а сам уже несколько десятилетий разрабатывал зеленые технологии, что сделало его сегодня их монополистом.

Так называемый “углеродный налог”, который, естественно, должны платить страны, обладающие топливными ресурсами, – своеобразная форма перераспределения мирового продукта в пользу развитых государств. При этом сама методика подсчета “выбросов” в атмосферу и их компенсации за счет лесов и других источников поглощения углекислого газа также разработана западными экспертами. Основное бремя “углеродного налога” ляжет, в значительной степени, на африканские государства, обладающие существенным углеводородным потенциалом, и превращенные в место размещения большого числа “грязных производств”.

Что касается африканских государств, то, теоретически, они могут выиграть за счет увеличения производства и переработки металлов, востребованных в зеленой энергетике. В Африке на сегодняшний день значительное число месторождений этих металлов не разрабатывается. Существует также высокая вероятность открытия новых месторождений. Однако это потребует значительных финансовых затрат и освоения новых технологий, которые Запад не спешит передавать африканским странам. Очевидно, что Африка заинтересована в поиске новых надежных партнеров в решении этих задач.

По мнению ряда экспертов, сам зеленый переход потребует резкого увеличения добычи нефти, газа и металлов, в том числе на Африканском континенте, а переработка последних является весьма энергозатратным процессом (например, для производства 1 кг индия необходимо в 50 раз больше энергии, чем для производства 1 кг алюминия) (Бортников и др., 2022). Более того, утилизация использованных компонентов ветровой и солнечной энергетики – весьма дорогостоящая и технологически сложная задача.

При этом страны-обладатели ресурсов в современной системе международных отношений не смогут диктовать свои условия на рынках металлов. Главными пунктами плана Гуттериша являются вовсе не всеобщий доступ к новым технологиям Запада для развивающихся стран, а “улучшение глобального доступа к компонентам и сырью” в обмен на возможность развивать у себя “зеленую энергетику” по западным технологиям и правилам. С целью получить этот доступ к дешевым ресурсам Запад под лозунгом демократии и справедливого распределения природных богатств, которые должны стать “общечеловеческим” достоянием, будет применять все имею-

**Таблица 12.** Запасы необходимых для зеленого перехода металлов в несостоявшихся и коррумпированных государствах (% от мировых запасов)

Металлы	Несостоявшиеся государства, %	Коррумпированные государства, %
Бокситы	44	68
Хром	55	100
Олово	69	84
Кобальт	70	70
Медь	41	41
Графит	73	100
Железо	42	60
Свинец	49	49
Литий	21	34
Марганец	66	86
Молибден	70	72
Никель	42	59
Редкоземельные металлы	58	94
Селен	76	76
Серебро	52	52
Теллур	67	67
Титан	57	62
Цинк	52	55

Примечание. По данным (Messner, 2018; Corruption... 2018: Ober, 2018).

щиеся в его распоряжении инструменты политического, экономического, информационного и военного давления, вплоть до вмешательства в выборы, смены неугодных режимов, развязывания войн и конфликтов и расчленения крупных государств на удобные Западу образования с высокой концентрацией определенных видов полезных ископаемых. Африка в этой ситуации окажется одним из самых уязвимых континентов.

В табл. 12 приводятся весьма интересные данные Трансперенси Интернешнл, в соответствии с которыми основная масса наиболее востребованных для современного развития ресурсов расположена в коррумпированных и несостоявшихся государствах. Вывод простой – передать управление этими ресурсами “демократической ответственности”, другими словами, Западу. При этом почему-то не упоминается, кто именно внес основной вклад в коррумпирование политических и экономических элит этих государств, а также в превращение их в “несостоявшиеся государства”.

И, наконец, Африка в ближайшие два десятилетия не сможет обеспечить электроэнергией 600 млн своего населения только за счет ВИЭ. Сегодня отказ от традиционных источников энергии там попросту невозможен и приведет как к экономическому коллапсу и росту социальной напряженности, так и к увеличению зависимости от западных инвестиций и технологий. На наш

взгляд, на Африканском континенте необходимо использовать различные виды энергии, как традиционные, включая атомную энергетику, так и возобновляемые, с учетом возможностей каждой страны.

## ВЫВОДЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

1. Чтобы понимать, насколько хорош или плох тот или иной сценарий (в нашем случае это касается зеленого перехода), необходимо несколько исходных условий. (1) Консенсус относительно того, что понимать, как “хорошо” или “плохо” для конкретной страны и группы стран. (2) Крайне важным, если не главным, оказывается вопрос: “А судьи кто?”. (3) Есть ли у участника возможность уйти от навязываемых решений?

2. Считается, что сам переход к зеленой экономике теоретически позволит человечеству улучшить состояние природной среды, бороться с изменениями климата и создавать современные рабочие места. При этом абсолютное большинство исследований посвящено **преимуществам** зеленого перехода, но практически отсутствуют научно выверенные сведения о его материальных и социальных издержках. То есть беспристрастной оценки “цены” перехода ни для человечества в целом, ни для отдельных стран и социумов нет вообще.

3. Африканские страны обладают существенным ресурсным потенциалом, необходимым для “зеленого перехода”, к тому же не до конца разведанным и распределенным. Переход к зеленым технологиям теоретически может улучшить положение тех стран, которые обладают высокотехнологичными материалами за счет резкого роста спроса и цен на соответствующие товары. В реальности же они будут подвергаться жесточайшему давлению западных ТНК с использованием всего арсенала колониальных инструментов для создания благоприятных условий по приобретению последними данных видов материалов с наименьшими издержками.

4. Отказ от традиционных видов энергии, как того требуют апологеты зеленой экономики, и сокращение инвестиций в разработку угольных, нефтяных и газовых месторождений, попросту приведет к энергетическому коллапсу в Африке.

5. Совершенно очевидно, что идея перехода неприкрыто направлена (как всегда, под благовидным предлогом) против стран, добывающих и продающих все виды традиционного топлива (нефть, газ, уголь и т.п.). Они окажутся в наиболее невыгодном положении. На них ляжет основное бремя “углеродного налога”. К таким государствам относятся как наша страна, так и африканские государства.

6. От энергетического перехода выиграют, в первую очередь, западные страны, население которых сокращается, зеленые технологии развиваются не один год, а “грязные” производства давно вынесены за их пределы. Именно в пользу этих стран и будет перераспределяться большая часть “углеродного налога”.

7. По сути, мы имеем дело с очередным “изменением правил игры в пользу владельцев игорного заведения”. Именно поэтому в последнее время Запад усиленно проталкивает концепцию “международного поведения, основанного на правилах” (естественно, устанавливаемых им) в противовес сложившемуся и официально фиксируемому международному праву.

8. Геополитическая и геоэкономическая нестабильность при зеленом переходе увеличится, поскольку в условиях “битвы за ресурсы”, которая сместится из углеводородной сферы в сферу добычи металлов, при сохранении существующей системы международных отношений Запад усилит свое давление на обладателей критически важных материалов, не гнушаясь никакими методами, от прямого давления до развязывания войн и конфликтов. Его цель — сохранить за счет зеленого перехода свое экономическое и политическое лидерство.

9. Объективно говоря, если реализуются стратегии Запада в отношении энергоперехода и климата, то в наибольшей степени это бремя будут

нести те страны, которые исторически **менее остальных участвовали в истощении традиционных источников энергии и загрязнении окружающей среды — самые бедные страны мира, в наибольшем количестве, страны Африки.** Проталкиваемая Западом схема навсегда закроет им путь к прорывному экономическому развитию. **Отсталость будет консервироваться технологически.** России пытаются уготовить ту же участь.

10. Странам-обладателям критически важных металлов и других видов ресурсов необходимо объединять свои усилия и четко определиться с термином “зеленая экономика” без привязки к западным стандартам, чтобы по максимуму использовать свои природные богатства и реально существующие преимущества зеленого перехода для нужд собственного развития и роста благосостояния своих граждан.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статья подготовлена в рамках проекта “Посткризисное мироустройство: вызовы и технологии, конкуренция и сотрудничество” по гранту Министерства науки и высшего образования РФ на проведение крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технологического развития (Соглашение № 075-15-2020-783).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамова И.О., Фитуни Л.Л.* Пути повышения эффективности африканской стратегии России в условиях кризиса существующего миропорядка // Вестник Российской академии наук. 2022. Т. 92. № 9. С. 837–848.
- 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. месторождения. 2022. Т. 64. № 6. С. 617–633.
- Зайнуллин Е.* Бокситское восстание // Коммерсантъ. 6 сентября 2021. <https://www.kommersant.ru/doc/4976014>
- Корендясов Е.Н.* Новые рубежи Африки на рынках минерального сырья // Металлы Евразии. 2012. № 5. С. 1–18.
- Кузнецов М.* Что делать инвестору после переворота в Гвинее // Forbes. 6 сентября 2021. <https://www.forbes.ru/finansy/439245-cto-delat-investoru-posle-perevorota-v-gvinee>
- Новости солнечной энергетики // Sun shines: солнечная энергетика. <https://sun-shines.ru/niobi-y-kpd/>
- Пять способов ускорить переход на возобновляемые источники энергии на данном этапе // ООН. 2023. <https://www.un.org/ru/climatechange/raising-ambition/renewable-energy-transition>
- Российский “Ви Холдинг” вышел из проекта в Зимбабве по добыче платины — Блумберг // Financial One. 6 июня 2022. <https://fomag.ru/news-streem/rossiyskiy-vi>

- kholding-vyshel-iz-proekta-v-zimbabve-po-dobyche-platiny-blumberg/
- “Русал” возобновил поставки бокситов из Гвинеи // Металлоснабжение и сбыт. 11 апреля 2022 г. <https://www.metalinfo.ru/ru/news/135846>
- Что такое возобновляемая энергия? // ООН. 2023. <https://www.un.org/ru/climatechange/what-is-renewable-energy>
- Энджей Аюк: в Африке почти 60% населения не имеет доступ к электричеству // РИА Новости. 15 ноября 2022. <https://ria.ru/20221015/ayuk-1824192214.html>
- Africa Energy Outlook 2022. France: International Energy Outlook, 2022. 250 p.
- Access to electricity (% of population). The World Bank Data. <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.ACCS.ZS>
- Brand D. Minerale van Suid-Afrika. Weet. <https://weet.co.za/sosiale-wetenskappe/minerale-van-suid-afrika/>
- Church C., Crawford A. Green Conflict Minerals: The fuels of conflict in the transition to a low-carbon economy. Winnipeg, Canada: International Institute for Sustainable Development, 2018. 48 p.
- Corruption Perceptions Index 2017. Transparency International. <https://www.transparency.org/en/cpi/2017>
- Cozzi L., Wetze D., Tonolo, G., Hyppolite II J., For the first time in decades, the number of people without access to electricity is set to increase in 2022. International Energy Agency (IEA). 3 November 2022. <https://www.iea.org/commentaries/for-the-first-time-in-decades-the-number-of-people-without-access-to-electricity-is-set-to-increase-in-2022>
- Energiewirtschaft in Afrika. Africa Business Guide. <https://www.africa-business-guide.de/de/maerkte/energiewirtschaft>
- Guinea – Country Commercial Guide. International Trade Administration. 2023. <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/guinea-mining-and-minerals>
- Light Up and Power Africa – A New Deal on Energy for Africa. African Development Bank Group. <https://www.afdb.org/en/the-high-5/light-up-and-power-africa-%E2%80%93-a-new-deal-on-energy-for-africa>
- Messner J.J., Haken N., Taft P., Onyekwere I., Blyth H., Fiertz C., Murphy C., Quinn A., Horwitz M. Fragile State Index 2018. Fund for Peace. <https://fundforpeace.org/2018/04/24/fragile-states-index-2018-annual-report/>
- Ober A. J. Mineral commodity summaries 2018. St. Louis, USA: U.S. Geological Survey, 2018. 187 p. <https://doi.org/10.3133/70194932>.
- Reichl C., Schatz M. World Mining Data 2022. Vienna, Austria: Federal Ministry of Agriculture, Regions and Tourism, 2022. 267 p.
- Renewable Energy Market Analysis: Africa and Its Regions. Abu Dhabi and Abidjan: International Renewable Energy Agency and African Development Bank, 2022. 318 p.
- Sguazzin A. Africa Needs \$700 Billion of Finance for Green Energy and Metals. Bloomberg. 10 May 2023. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-05-10/africa-needs-700-billion-of-finance-for-green-energy-and-metals>
- U.S. Geological Survey 2022. Mineral commodity summaries 2022. St. Louis, USA: U.S. Geological Survey, 2022. 202 p. <https://doi.org/10.3133/mcs2022>.

УДК 546.34

## ЛИТИЕВЫЙ БУМ: ИСТОЧНИКИ ЛИТИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РОССИЙСКОЙ ЛИТИЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

© 2023 г. А. Ю. Цивадзе<sup>а</sup>, \*, А. А. Бездомников<sup>а</sup>, Г. В. Костикова<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,  
Ленинский проспект, д. 31, корп. 4, Москва, 119071 Россия

\*E-mail: atsiv43@mail.ru

Поступила в редакцию 28.05.2023 г.

После доработки 02.06.2023 г.

Принята к публикации 10.06.2023 г.

Взрывное развитие возобновляемой энергетики в последние годы приводит к перекраиванию геополитической картины мира. Символом нового энергоперехода стали всеми узнаваемые солнечные панели и ветрогенераторы, в то время как литий-ионные аккумуляторы стали его основой и драйвером развития. Именно литий-ионные аккумуляторы позволили преодолеть главную проблему возобновляемой энергетики – непостоянство и неконтролируемость. В статье освещается литиевая проблема, причины волатильности цен на литий, основные источники лития и сложности его добычи. Помимо этого, рассмотрены перспективы развития литиевой промышленности России и актуальные отечественные разработки в технологиях добычи лития.

*Ключевые слова:* литий, минеральное литиевое сырье, гидроминеральное литиевое сырье, отработавшие литий-ионные аккумуляторы, экстракция, сорбция

**DOI:** 10.31857/S001677702305009X, **EDN:** YPBORA

Литиевые источники тока являются неотъемлемой частью портативной электроники, электромобилей, беспилотных устройств, которые все больше заполняют нашу жизнь. Оптимальное сочетание эксплуатационных характеристик и большие перспективы совершенствования литиевых источников тока позволяют с уверенностью заявлять, что литиевый бум будет сопровождать нас на протяжении всего 21 века. Не стоит также забывать, что литий применяется не только при производстве аккумуляторов, но и в атомной энергетике, фармацевтике, металлургии, а также в керамике, стеклах, смазочных материалах и системах очистки воздуха.

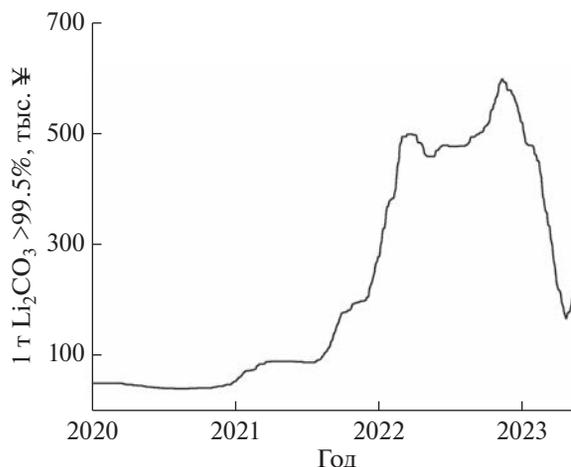
Возобновляемая энергетика, портативные устройства, электромобили, беспилотники и, в конце концов, литий – все это будет являться основой экономики государств будущего. Страны, не владеющие технологиями добычи лития и литиевыми производствами, не смогут занять лидирующие позиции в грядущем будущем. Такую перспективу понимают и осознают развитые страны, что подстегивает конкуренцию международных компаний за литиевые месторождения, за технологии добычи лития и за производства литиевых аккумуляторов. Наибольшие успехи достигаются в такой борьбе с применением мягкой силы: путем различных способов поддержки оте-

чественных исследователей, специалистов, компаний; привлечения высококвалифицированных специалистов; мер экономического стимулирования (гранты, инвестиции, субсидии). Академическая мобильность при должной политике государства позволяет проводить “перекачку мозгов” и в обратном направлении, забирая при этом ценный опыт работы отечественных специалистов за рубежом. Наглядным примером умелого использования академической мобильности является Китай, который смог таким образом развить отечественный технологический сектор.

Структура потребления лития за последние десятилетия изменилась кардинально, и в настоящее время 80% всего добытого лития идет на производство литий-ионных аккумуляторов (фиг. 1). Такие изменения, как уже было сказано, связаны с их значительной ролью в новом энергопереходе, при котором литий часто именуют новым золотом или новой нефтью. Исходя из данных геологической службы США, за период с 2007 по 2022 гг. (фиг. 1) производство лития возросло с 25 тыс. т/год до 130 тыс. т/год. Доля лития, направленного на производство аккумуляторов, практически линейно возрастала с 20 до 80%. В свою очередь, стоит отметить, что большой спрос на литий сталкивается с ограниченным предложением, что наглядно демонстрирует биржевая стоимость кар-



Фиг. 1. Структура потребления лития по годам.



Фиг. 2. Исторические данные стоимости  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  аккумуляторного сорта на Шанхайской фьючерсной бирже.

боната лития (фиг. 2). 2022 год стал настоящим индикатором острого дефицита лития на рынке, цена на него взлетела с 33 тыс. юань (минимум 2020 года) до 600 тыс. юань за тонну  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ . К началу 2023 года цена на литий скорректировалась до 160 тыс. и продолжила новый активный рост.

С чем же связана столь высокая волатильность цен на литий, ведь литий является весьма распространенным химическим элементом на земле (кларк лития  $3.2 \times 10^{-3}$  мас. %) и не причисляется к редким элементам? Физико-химические свойства соединений лития являются и его преимуществом в практическом применении, и его недостатком в процессах добычи. Добыча лития это весьма сложная и нетривиальная задача по следующим причинам:

- Более 90% всего лития на земле находится в мировом океане и морской воде, непригодных в настоящее время для добычи лития.
- Отставание в технологиях добычи, поскольку до сих пор литиевая промышленность держится на оборудовании и технологиях прошлого века.
- Часто высокое содержание в сырье близких по свойствам с литием элементов, из-за чего задача извлечения лития подобна поиску иголки в стоге сена.
- Очень ограниченный выбор литий-селективных экстрагентов и сорбентов.

Проблемы в добыче лития в сочетании с высоким спросом являются причиной дефицита лития и позволяют, с некоторыми оговорками, обсуждать проблему добычи лития наравне с добычей редких металлов и с процессами разделения близких по свойствам редкоземельных элементов.

Мировые запасы лития составляют порядка 230 млрд тонн, в то время как в минеральных источниках находится около 65 млн т, из них лишь 15 млн т доступны к эксплуатации на уровне со-

временных технологий и экономической целесообразности (Vikström et al., 2013). Запасы лития в гидроминеральных источниках оцениваются в 112 млн т, большая часть из них состоит из весьма бедных месторождений, граничащих по своему составу с морской водой (Vikström et al., 2013).

В России, по оценке Геологической службы США, лития не менее 1 млн т, поровну между минеральными и гидроминеральными источниками (Jasinsk, 2023). Оценки отечественных исследователей указывают на значительно большие запасы лития в России (Boyarcko et al., 2022; Толкушина и др., 2012). Доказанные минеральные запасы составляют не менее 1.65 млн т, в свою очередь гидроминеральные ресурсы лития ранее изучались лишь на уровне их прогнозирования, и лишь по геофизическим данным запасы лития на одном только Знаменском месторождении должны составлять порядка 4.2 млн т (при объеме рассола 9.8 млн  $\text{m}^3$  и средней концентрации 0.42 г/л по литию) (Толкушина и др., 2012). Исходя из этих оценок, Россия занимает уже 5-е место среди стран по запасам лития на уровне запасов в Китае (6.8 млн т) и в Австралии (7.9 млн т), входящих в тройку лидеров по его добыче (Jasinsk, 2023). Преимущественно весь литий России должен находиться в гидроминеральных источниках.

В работе (Boyarcko et al., 2022) представлена наиболее детальная на настоящий момент карта разведанных Российских месторождений лития. Минеральные литиеносные провинции встречаются на Кольском полуострове, Южном Урале, в Алтайском крае, в Кемеровской области, в Республике Тыве, в районе Восточных Саян, Забайкальском крае и Якутии, а также на границе с Китаем в ЕАО, Хабаровском и Приморском краях. Гидроминеральные месторождения в большин-

**Таблица 1.** Общие характеристики литийсодержащих минералов

Название	Формула	Содержание Li, мас. %	Твердость по шкале Мооса	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Эвкрипит	LiAlSiO <sub>4</sub>	5.51	6.5	2.6–2.7
Сподумен	LiAlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	3.73	6.5–7	3.1–3.2
Петалит	LiAlSi <sub>4</sub> O <sub>10</sub>	2.09	6–6.5	2.4–2.5
Лепидолит	KLi <sub>2</sub> Al(Al,Si) <sub>3</sub> O <sub>10</sub> (F,OH) <sub>2</sub>	3.58	2.5–3	2.8–2.9
Амблигонит	(Li,Na)AlPO <sub>4</sub> (F,OH)	3.44	5.5–6	3.0–3.1
Циннвальдит	KLiFe <sub>2</sub> + Al(AlSi <sub>3</sub> )O <sub>10</sub> (F,OH) <sub>2</sub>	1.59	3.5–4	2.9–3.0
Жадарит	LiNaSiB <sub>3</sub> O <sub>7</sub> (OH)	3.16	4–5	2.5
Гекторит	Na <sub>0,3</sub> (Mg,Li) <sub>3</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	0.53	1–2	2.5

стве случаев – подземные воды (геотермальные и техногенные рассолы) – представлены крупными Крымско-Северокавказским, Прикаспийским и Ангаро-Ленским литиеносными бассейнами и рядом других индивидуальных месторождений. Действующие предприятия по добыче лития находятся в поселке имени Малышева (Свердловская область) и на Знаменском месторождении. В СМИ присутствует информация об организации производств на Ковыктинском месторождении и на Кольском полуострове. Стоит также отметить, что на фоне развития литиевой тематики в России и благоприятной политико-экономической конъюнктуры в настоящее время активно реализуется более 100 новых геологоразведочных проектов (Boyarko et al., 2022).

Помимо минеральных и гидроминеральных источников, перспективным источником лития является вторичное сырье, формируемое преимущественно из отработавших литий-ионных аккумуляторов.

Можно рассчитать, что за этот период было произведено аккумуляторов, суммарно содержащих в себе порядка 500 тыс. т лития. Большая часть этого лития будет формировать вторичную сырьевую базу, которая некоторое время будет расти до момента насыщения потребительского рынка и постоянно пополняться. При организации эффективного сбора и переработки отработавших литий-ионных аккумуляторов можно достичь замыкания товарно-сырьевого цикла, что обеспечит возобновляемость литиевых ресурсов.

Минеральное литиевое сырье, как правило, классифицируют по содержанию тех или иных пород. Примеры литийсодержащих минералов и их характеристики представлены в табл. 1. Амблигонит, эвкрипит, лепидолит, петалит, сподумен и циннвальдит относятся к пегматитам, а гекторит и ядарит – к глинопоподобным минералам. С промышленной точки зрения наиболее выгодными источниками являются месторождения, содержащие сподумен, которые преоблада-

ют в России. В действительности в рамках одного месторождения встречается целый набор литиевых минералов, например эвкрипит, образующийся при естественных геологических процессах и являющийся вторичным продуктом сподумена, чрезвычайно богат литием.

Представленное содержание лития в каждом из минералов соответствует “чистому” минералу, очевидно, что месторождения могут содержать разное количество тех или иных минералов и качество месторождения зависит от доли пустой породы, от присутствия других ценных компонентов или компонентов, мешающих добыче, а также от транспортной доступности и климатических условий. Большая часть Российских месторождений уступает по всем этим показателям, например, Австралийским минеральным месторождениям. Однако истощение наиболее рентабельных минеральных месторождений в других странах – один из решающих факторов перехода на менее рентабельные месторождения, типичные для России.

Степень извлечения лития из минерального сырья классическими технологиями составляет 60–70%, и основные затраты производства связаны с большим расходом реактивов и расходом электроэнергии на всех стадиях, включая шихтование, выщелачивание, концентрирование и карбонатное осаждение. В процессах добычи лития вопрос селективности рассматривается редко из-за низкого содержания близких по свойствам с литием элементов, в основном акцентируют внимание на этапе обогащения руд и снижении энергозатрат в процессах выщелачивания.

Классификация гидроминеральных источников сырья или литиевого гидроминерального сырья (ЛГМС) более разнообразна из-за их значительных отличий. Рассолы из соленых озер содержат в себе большой спектр катионов и анионов, как правило, это хлориды, сульфаты и карбонаты щелочных и щелочноземельных металлов. В случае рассолов, содержащих сульфаты и карбонаты, или регулярно омывающих сульфатные и карбо-

**Таблица 2.** Компонентный состав аккумуляторов различного типа (18650 без стальной капсулы) (Wang et al., 2014)

Компонент	Литий-кобальт оксидный LCO или ICR	Литий-железо фосфатный LFP	Литий-марганец оксидный LMO	Литий-никель-марганец-кобальт оксидный NMC
Li, %	2.4	1.8	1.8	1.4
Co, %	20.7	0.0	0.0	11.7
Mn, %	0.0	0.0	24.4	10.9
Ni, %	1.5	0.0	0.0	11.7
Fe, %	0.0	14.6	0.0	0.0
Cu, %	8.7	12.3	1.3	9.4
Al, %	6.2	9.8	1.3	6.4
Прочее, %	60.3	61.5	71.1	48.6

натные породы, содержание щелочноземельных металлов может быть крайне низким, в таком случае рассолы преимущественно содержат литий, натрий и калий.

Достаточно полная классификация ЛГМС приведена в работе (Рябцев, 2011). Согласно этой классификации, все известное в мире литий-содержащее гидроминеральное сырье можно разделить на две большие группы: ЛГМС, залегающее в районах с ярко выраженным аридным климатом, и ЛГМС, залегающее в районах с не аридным климатом. Далее автор разделяет рассолы на целевые (содержание лития выше 0.01 г/л) и нецелевые (менее 0.01 г/л), исходя из возможности промышленной переработки этих рассолов. Целевые рассолы разделяются на рассолы с повышенным содержанием лития (выше 0.10 г/л) и на рассолы с невысоким содержанием лития (0.01–0.10 г/л). Исходя из конкретного состава каждого целевого ЛГМС можно разделить на сырье, концентрируемое упариванием по галургической схеме до содержания лития более 10 г/л (традиционное ЛГМС), незначительно концентрируемое до содержания лития не выше 1.5 г/л и не концентрируемое по литию упариванием по галургической схеме (нетрадиционное ЛГМС).

В условиях аридного климата возможна организация концентрирования ЛГМС в естественных условиях (например, гелиоконцентрирование) с минимальными энергозатратами. Согласно карте аридного климата, составленной в соответствии с классификацией климатов Кеппена–Гейгера, в России отсутствуют месторождения, залегающие в районах с ярко выраженным аридным климатом.

На основе рассмотренной классификации и представленных в литературе данных по составу ряда месторождений ЛГМС России (табл. 1) можно сделать вывод, что в России присутствует ЛГМС хлоридно-натриевого и хлоридно-кальциевого типа, залегающее в районах неаридного климата, с содержанием лития не более 0.5 г/л.

В случае с литиевыми источниками тока классификация вторичного сырья намного проще.

Аккумуляторы являются рукотворным изобретением человека, и каждый из них имеет известный состав (табл. 2.). Исходя из принципа их работы можно выделить наиболее распространенные литий-ионные и наименее распространенные литий-металлические и литий-воздушные аккумуляторы. Долгое время не было четких стандартов и внешних атрибутов литиевых аккумуляторов, что затрудняло их сбор, сортировку и дальнейшую переработку. В последнее время производители стремятся выпускать единообразные аккумуляторы с окраской, характеризующей их качественный состав, существует общедоступная база информации о цилиндрических аккумуляторах, созданная энтузиастами (Cell Database ...).

В настоящее время большая часть отработавших литий-ионных аккумуляторов – это аккумуляторы, произведенные в период с 2000-ых по 2020 гг., и они трудно поддаются сортировке, поэтому их обычно разделяют на плоские (от мобильных телефонов и от части ноутбуков), цилиндрические (от электромобилей, электронных сигарет, инструмента и переносных внешних источников тока), а также аккумуляторы от ноутбуков. Предварительная сортировка вручную не всегда позволяет отделить литиевые аккумуляторы от Ni–Cd-аккумуляторов, которые раньше часто использовали в портативной технике. В ближайшем будущем, когда полностью выйдут из оборота нестандартные аккумуляторы, их сортировку и прямую разборку возможно будет осуществлять автоматически с вторичным использованием компонентов и минимальным воздействием на окружающую среду.

Таким образом, существует всего 3 источника лития: природные и техногенные рассолы, минеральные или рудные месторождения, отработавшие литий-ионные аккумуляторы. Технологии добычи лития из твердых источников включают в себя различные пирометаллургические и/или гидрометаллургические процессы. Получаемые таким образом литийсодержащие растворы можно отнести к техногенным литийсодержащим рассолам, и дальнейшее выделение лития, с некоторыми ого-

ворками, можно рассматривать параллельно с выделением лития из природных рассолов.

Каковы позиции России в литиевом вопросе и какие перспективы? Как уже было сказано, Россия имеет большие залежи лития, сопоставимые с мировыми литиевыми гигантами. Однако в процессе глубоких структурных преобразований 90-х гг. прошлого века литиевая промышленность остановилась в своем развитии. Несмотря на это, настоящая экономическая и политическая конъюнктура способствует возрождению Российской литиевой промышленности.

К настоящему моменту известно о ряде перспективных проектов: РОСАТОМ совместно с Норникелем планируют создание предприятий по добычи лития из минеральных источников сырья на Кольском полуострове, Газпром совместно с Иркутской нефтяной компанией (ИНК) планируют добычу лития на Ковыктинском газоконденсатном месторождении, также формируются проекты по переработке отработавших литий-ионных аккумуляторов. Однако отечественные технологии добычи лития, активно использовавшиеся во времена СССР, не применимы в современных реалиях и могут оказаться малорентабельными. В свою очередь, ни одна иностранная компания не станет продавать лицензии на по настоящему революционные или высокоэффективные технологии. Также доступные зарубежные технологии могут лишь временно удовлетворить потребность в литии и принести незначительную прибыль без перспектив развития. Решение может быть найдено лишь при развитии новых отечественных технологий.

На сегодняшний день существует два направления развития Российских технологий извлечения лития: сорбционное и экстракционное. В частности, одним из актуальных решений, предлагаемых Российскими специалистами, является технология на основе алюминий-содержащих сорбентов, разработанных при кооперации Сибирских ученых под началом д.х.н. Коцупало Н.П. из Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (Менжерес, 2004; Коцупало, 2013; Рябцев и др., 2020). Эту технологию активно развивают в последние годы независимо друг от друга ООО “Экостар-Наутех” и ГЕОХИ РАН.

С точки зрения крупнотоннажного производства наиболее перспективным является развитие экстракционных процессов выделения лития, так как они значительно превосходят сорбционные процессы по своей производительности. Уникальность экстракционного метода состоит еще и в том, что на его базе можно создать унифицированную технологию извлечения лития с минимальным количеством стадий переработки.

Экстракционное направление активно развивается в Институте физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина (ИФХЭ РАН), где был разработан ряд новых литий-селективных экстрагентов (Ivanova et al., 2019; Solov'ev et al., 2021;

Tsivadze A.Y. et al., 2022; Bezdomnikov et al., 2023; Kireeva, 2023), которые в сравнении с существующими аналогами имеют лучшие экстракционные характеристики и более низкую стоимость. На основе новых литий-селективных экстрагентов разработаны способы селективного извлечения лития из рассолов литий-натриевого и литий-кальциевого типов, которые составляют литиевые гидроминеральные источники сырья, а также образуются в процессах переработки минерального сырья. Таким образом, наработки ИФХЭ РАН позволяют создать исключительно экстракционную технологию добычи лития из техногенных (продукты выщелачивания минерального сырья и отработавших литий-ионных аккумуляторов, попутные воды, тампонажные рассолы) и природных (геотермальные воды, соленые озера) рассолов, обладающую следующими преимуществами:

- Высокая скорость, производительность и непрерывность процесса;
- Значительная экономия энергии и ресурсов на этапах концентрирования и осаждения;
- Экстрагент экологически безопасен и используется многократно;
- Возможность организации безотходного производства;
- Высокое качество (аккумуляторный сорт) получаемой литиевой продукции;
- Низкий расход реактивов в сравнении с карбонатными и сорбционными процессами.

В целом в последние годы все больше научных групп и организаций начинают вносить свой вклад в развитие Российской литиевой тематики, не только в разработке новых литий-селективных экстрагентов и способов добычи лития (Гарипова и др., 2018; Kalmykov, 2021; Milevskii et al., 2022; Nesterov, Zakurdaeva, 2022), но и в разработке литиевых источников тока (Корнев и др., 2022; Kulova et al., 2022; Чирков и др., 2022a, 2022b). Параллельно с этим активно развиваются производство электромобилей и беспилотных устройств. Все эти процессы приводят к увеличению внутреннего спроса и предложения литиевой продукции и открывают большие перспективы развития литиевой промышленности в России. В задачи государства должно входить наращивание поддержки этих начинаний и создание благоприятных условий для развития отечественных технологий, науки и промышленности. Однако в настоящее время на основе имеющихся литературных данных невозможно провести качественный и количественный анализ технико-экономических показателей предложенных решений с точки зрения производительности, технологичности, экономичности и экологичности. Настало время безотлагательно провести экспертизу всех предложенных решений на уровне Российской академии наук на основе разработанных четких критериев оценки необходимых показателей.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (номер проекта 122011300052-1).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гарипова А.Р. и др.* Мембранная экстракция ионов лития и натрия О-(2-этилгексил)-п,п-бис(2-этилгексил)аминометилфосфоновой кислотой // Ж. общей химии. 2018. Т. 88. № 1. С. 126–130.
- Корнев П.В. и др.* Титанат лития, допированный европием, как анодный материал для литий-ионных аккумуляторов // Ж. физической химии. 2022. Т. 96. № 2. С. 294–301.
- Коцупало Н.П. и др.* Влияние структурных факторов на сорбционные свойства хлорсодержащей разновидности двойного гидроксида алюминия лития // Ж. прикладной химии. 2013. Т. 86. № 4. С. 518–524.
- Менжерес Л.Т., Рябцев А.Д., Мамылова Е.В.* Селективный сорбент для извлечения лития из хлоридных высокоминерализованных рассолов // Изв. Томского политехнического университета. 2004. Т. 307. № 7. С. 76–80.
- Рябцев А.Д. и др.* Научные основы производства селективного к литию сорбента и промышленной технологии извлечения хлорида лития из гидроминерального поликомпонентного сырья // Технология неорганических веществ и материалов. 2020. № 8. С. 338–352.
- Рябцев А.Д.* Переработка литиеносного поликомпонентного гидроминерального сырья на основе его обогащения по литию. Новосибирск, 2011.
- Толкушина Е.А., Торикова М.В., Комин М.Ф.* Минерально-сырьевая база лития: проблемы развития и использования // Геологоразведка и сырьевая база. 2012. Т. 2. С. 7.
- Чирков Ю.Г. и др.* Гальваностатический разряд литий-кислородного аккумулятора: влияние толщины активного слоя на характеристики положительного электрода // Электрохимия. 2022а. Т. 58. № 1. С. 3–12.
- Чирков Ю.Г. и др.* Литий-кислородный (воздушный) аккумулятор: о возможности улучшения характеристик процесса разряда // Ж. физической химии. 2022б. Т. 96. № 5. С. 724–732.
- Bezdomnikov A.A. et al.* Liquid extraction of lithium using a mixture of alkyl salicylate and tri-n-octylphosphine oxide // Sep. Purif. Technol. 2023. V. 320. P. 124137.
- Boyarko G.Y., Khatkov V.Y., Tkacheva E. V.* Lithium Raw Potential in Russia // Bull. Tomsk Polytech. Univ. Geo Assets Eng. 2022. V. 333. № 12. P. 7–16.
- Cell Database [Electronic resource]. URL: <https://secondlifestorage.com/index.php?pages/cell-database/>.
- Ivanova I.S. et al.* 2,4,6-Tris[2-(diphenylphosphoryl)-4-ethylphenoxy]-1,3,5-triazine: A new ligand for lithium binding // Inorganica Chim. Acta. Elsevier. 2019. V. 497. P. 119e095.
- Jasinsk S.M.* Mineral Commodity Summaries // Mineral Commodity Summaries 2023. 2023. P. 108–109.
- Kalmykov D. et al.* Operation of three-stage process of lithium recovery from geothermal brine: Simulation // Membranes (Basel). 2021. V. 11. № 3. P. 1–21.
- Kireeva N., Baulin V.E., Tsvadze A.Y.* A Machine Learning-Based Study of Li<sup>+</sup> and Na<sup>+</sup> Metal Complexation with Phosphoryl-Containing Ligands for the Selective Extraction of Li<sup>+</sup> from Brine // Chem. Engineering. 2023. V. 7. № 3. P. 41.
- Kulova T.L. et al.* Binder-Free Ge-Co-P Anode Material for Lithium-Ion and Sodium-Ion Batteries // Batteries. 2022. V. 8. № 8. P. 98.
- Milevskii N.A. et al.* Separation of Li(I), Co(II), Ni(II), Mn(II), and Fe(III) from hydrochloric acid solution using a menthol-based hydrophobic deep eutectic solvent // Hydrometallurgy. 2022. V. 207. P. 105777.
- Nesterov S. V., Zakurdaeva O.A.* Targeted preparation of highly efficient lithium extractants based on 14-membered crown ethers // Mendeleev Commun. 2022. V. 32. № 5. P. 670–671.
- Solov'ev V., Baulin D., Tsvadze A.* Design of phosphoryl containing podands with Li<sup>+</sup>/Na<sup>+</sup> selectivity using machine learning // SAR QSAR Environ. Res. Taylor and Francis Ltd. 2021. V. 32. № 7. P. 521–539.
- Tsvadze A.Y. et al.* A New Extraction System Based on Isopropyl Salicylate and Trioctylphosphine Oxide for Separating Alkali Metals // Molecules. 2022. V. 27. № 10. P. 3051.
- Vikström H., Davidsson S., Höök M.* Lithium availability and future production outlooks // Appl. Energy. Elsevier Ltd, 2013. V. 110. P. 252–266.
- Wang X. et al.* Economic and environmental characterization of an evolving Li-ion battery waste stream // J. Environ. Manage. 2014. V. 135. P. 126–134.

УДК 621.039

## МИНЕРАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ И ИЗОЛЯЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

© 2023 г. В. А. Петров<sup>а</sup>, \*, С. В. Юдинцев<sup>а</sup>, \*\*

<sup>а</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,  
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

\*E-mail: vlad243@igem.ru

\*\*E-mail: yudintsevsv@gmail.com

Поступила в редакцию 30.05.2023 г.

После доработки 05.06.2023 г.

Принята к публикации 10.06.2023 г.

Рассмотрены задачи по обеспечению устойчивого развития атомной отрасли России, которые направлены на решение проблем начальных и завершающих стадий ядерного топливного цикла от воспроизводства минерально-сырьевой базы урана до обращения с жидкими высокоактивными отходами переработки отработавшего ядерного топлива. Проведен анализ тенденций развития минерально-сырьевого комплекса в связи с прогнозируемым ростом выработки электроэнергии на атомных станциях. На примере территории юго-восточного Забайкалья в рамках актуальных прогнозно-минерагенических исследований предложены новые подходы к выделению и обоснованию поисковых площадей на основе моделей минералообразующих систем урановых месторождений с использованием данных дистанционного зондирования Земли, ГИС-моделирования и нейросетевых технологий. Проведен детальный анализ тенденций в решении задач завершающих стадий ядерного топливного цикла. Для изоляции и последующего захоронения РЗЭ-актинидной фракции высокоактивных отходов предлагается использовать фосфатные стеклокерамики с монацитом.

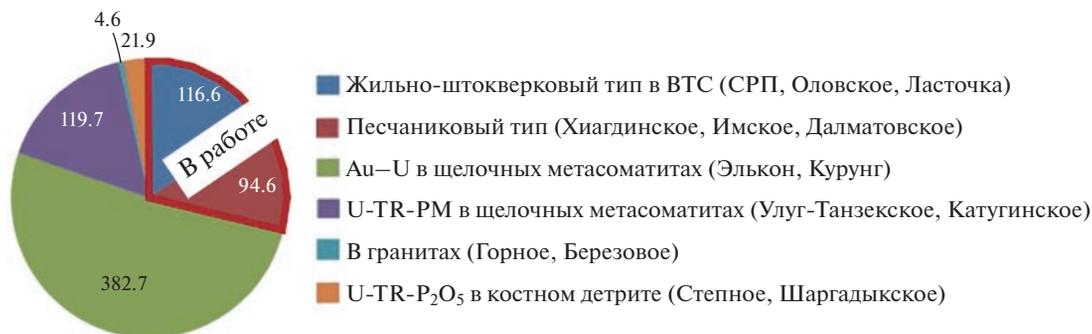
*Ключевые слова:* ядерная энергетика, минерально-сырьевая база, урановые месторождения, высокоактивные отходы, иммобилизация

DOI: 10.31857/S0016777023050076, EDN: WCNXEV

### ВВЕДЕНИЕ

В материалах МАГАТЭ отмечено, что “по мере того как вводятся в эксплуатацию новые АЭС, все больше стран рассматривает ядерную энергетику как возможное средство достижения целей в области борьбы с изменением климата и обеспечения энергетической безопасности. В условиях развивающегося глобального кризиса и на фоне восстановления мира после пандемии COVID-19 ядерная отрасль достигла второго за последнее десятилетие результата по годовому объему производства” (Energy..., 2022). Ядерный топливный цикл (ЯТЦ) включает добычу и обогащение урана, изготовление топлива и его использование в реакторах на АЭС, затем отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) направляется на переработку, хранение или окончательное захоронение в геологических формациях. В ходе переработки до 95 мас. % ОЯТ может быть регенерировано и снова направлено на АЭС. Если рассматривать отдельные схемы ЯТЦ, то все они начинаются с добычи урана, а завершаются изоляцией радиоактивных отходов в геологических формациях.

Выдающийся советский и российский ученый и государственный деятель академик Н.П. Лаверов, чтения памяти которого прошли в Президиуме РАН 02.02.2023 года в преддверии Дня российской науки, внес неосценимый вклад в развитие атомной отрасли в России – от воспроизводства минерально-сырьевой базы (МСБ) урана до геологической изоляции отработавших ядерных материалов. Николай Павлович начал научно-организационную деятельность в ИГЕМ РАН, в 1958–1966 гг. он работал младшим научным сотрудником и ученым секретарем (фактически руководителем) на геологической станции Экспедиции №1 в поселке Табашар, Таджикистан. Круглогодичная станция имела филиалы практически на всех эксплуатируемых урановых месторождениях. Основное внимание Николая Павловича привлекли месторождения уран-молибденовой рудной формации в вулканотектонических структурах, в 1972 г. он защитил докторскую диссертацию “Геологические условия формирования урановых месторождений в областях континентального вулканизма (на примере Срединного Тянь-Шаня)” (Лаверов, 1972). Этот объемный труд остается ис-



Фиг. 1. Распределение запасов урана по основным геолого-промышленным типам, в тыс. тонн (Машковцев и др., 2021).

точником идей о генезисе урановых месторождений в вулканотектонических структурах, условиях мобилизации и миграции рудных компонентов, и положении полей разгрузки продуктивных ураноносных гидротермальных растворов.

По производству атомной электроэнергии Россия занимает 4-е место в мире, а по доле атомной энергетики в общем объеме производства электроэнергии мы находимся на 16-ом месте (Energy..., 2022). Два года назад это было 18-е место. Сохранение этой тенденции требует разработки новых подходов к сочетанию методов и средств воспроизводства МСБ урана и обращения с отходами разного уровня радиоактивности в едином контексте функционирования и развития ЯТЦ России.

### МИНЕРАЛЬНЫЕ РЕСУРСЫ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ РОССИИ

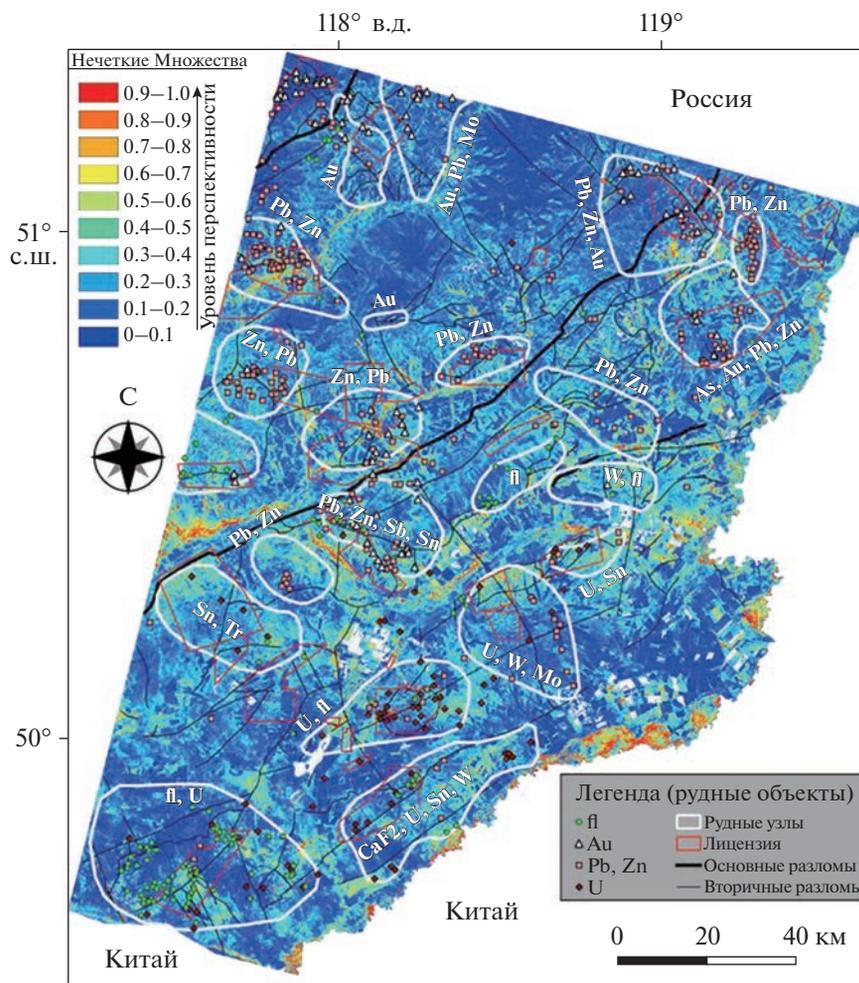
В соответствии с докладом (Государственный..., 2022), который готовился под общим руководством ФГБУ «ВИМС», балансовые запасы урана России на 01.01.2022 г. составляли 707.7 тыс. т (53 месторождения, на 8 объектах учтены и забалансовые запасы). По ряду ключевых показателей мы имеем одну из крупнейших минерально-сырьевых баз урана в мире (Бортников и др., 2021). Однако анализ распределения запасов урана по основным геолого-промышленным типам месторождений (фиг. 1) показывает, что из этого объема в работе находится около четверти. Те запасы, которые находятся в резерве, либо имеют высокую себестоимость добычи, например, Эльконские месторождения Алдана (130–260 долларов за кг), либо уран является попутным элементом в комплексных редкоземельных рудах (месторождения Улуг-Танзекское, Катугинское, Степное, Шаргадыкское и др.).

Если рассматривать проблему воспроизводства МСБ урана через прогноз мировой выработки электроэнергии (Energy..., 2022) на атомных станциях по сценариям МАГАТЭ (от 6.9% до 14%

к 2050 г.), то увидим следующее. Во-первых, в мире из примерно 56 тыс. т добываемого в год урана около 65% приходится на страны, тяготеющие в своем политико-экономическом развитии к России, а около 35% на страны, которые ориентируются на США. Во-вторых, по имеющимся оценкам (Бойцов, 2021; Тарханов, Бугриева, 2021; Uranium..., 2023), в период 2010–2020 гг. потребность в природном уране покрывалась добычей, с 2020 г. наметился дефицит уран-добывающих мощностей, и к 2025 году прогнозируется снижение добычи урана и появление дефицита мощностей из-за вывода из эксплуатации рудников в связи с истощением запасов. Тенденция к увеличению выработки электроэнергии на АЭС сохранится даже в случае широкой имплементации технологий «зеленой энергетики».

Каким образом специалисты урановой геологии могут реагировать на эти тенденции? Например, с помощью определения рудовмещающих комплексов и ураноносных структур методами ГИС-моделирования с использованием минерально-системного подхода. В его основе лежит парадигма «источник рудоносных флюидов—пути перемещения—физико-химические обстановки рудоотложения в структурных ловушках» (Wyborn et al., 1994; Skirrow et al., 2009). Примером совмещения в пространстве и во времени минеральных систем, связанных с гранитами и вулканами, служат месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье (Андреева и др., 2020; Пэк и др., 2020; Петров и др., 2022).

Расчетные и полученные *in situ* данные показывают, что активные и проницаемые для флюидов разломы имеют определенную ориентировку в поле действующих напряжений и деформаций (Jaeger, Cook, 1979; Fuchs, Müller, 2001; Zoback et al., 2002). Нами предложено применять алгоритм, включающий: выделение разломно-трещинных структур, проницаемых для рудоносных растворов в период рудообразования; установление мультиспектральных характеристик предрудных,



**Фиг. 2.** Прогнозная схема распределения комплексов и структур, перспективных на гидротермальную рудную минерализацию в юго-восточном Забайкалье, созданная на основе обработки и интерпретации спектральных характеристик оптических данных ДЗЗ (аппарат Landsat-8) в сочетании с ГИС-проектированием, геолого-геофизическим и металлогеническим моделированием с использованием алгоритмов нечеткой логики (Nafigin et al., 2022).

рудосопровождающих и пострудных метасоматитов по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ, спутники LANSAT-8 и WorldView-2); приложение нейросетевых технологий для анализа ключевых факторов уранового рудообразования. Использование этого подхода показано на примере юго-восточного Забайкалья (фиг. 2), где имеется крупнейший в стране комплекс по добыче и переработке урана – ПАО «Приаргунское производственное горно-химическое объединение», а также другие предприятия по добыче руд стратегических металлов.

Необходимо также учитывать, что вне зависимости от способа добычи (карьер, шахта, подземное выщелачивание), срок от открытия месторождений до начала освоения неуклонно растет. Если в 1950–1960-х гг. он составлял 5–10 лет, то сейчас уже 20–40 лет. Поэтому для ликвидации

дефицита уранодобывающих мощностей требуется все больше времени и ресурсов, а также внедрение новых технологий поисков, оценки и разведки глубокозалегающих «скрытых» рудных тел (Машковцев, Петров, 2023). Наметившиеся в настоящее время изменения в алгоритме обоснования поисково-разведочных работ на уран от описательной структурно-формационной классификации МАГАТЭ на основе 15 типов, 37 подтипов и 14 классов урановых месторождений (Geological..., 2018), к геолого-генетическим моделям месторождений (моделям урановых минеральных систем) с акцентом на состав и свойства рудоносных флюидов (Descriptive..., 2020) открывают важную новую страницу в урановой геологии и создают хорошие перспективы при поисках и разведке минеральных ресурсов для устойчивого развития ядерной энергетики России.

## ИЗОЛЯЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

К 2021 г. в 31 стране мира имелось 442 действующих ядерных реактора и еще 52 находились в стадии строительства. Для их работы необходимо около 8000 т топлива в год, что соответствует 60000 т природного урана (Uranium..., 2023). Подавляющая часть блоков относится к реакторам на медленных (тепловых) нейтронах – ВВЭР, РБМК, PWR, BWR и др., где используется оксидное урановое топливо, содержащее до 4 мас. %  $^{235}\text{U}$ . Тепловая, а значит и электрическая, энергия, вырабатываемая реактором, примерно на 2/3 обусловлена делением  $^{235}\text{U}$  и на 1/3 – делением  $^{239}\text{Pu}$ , образующегося при захвате нейтронов ядрами  $^{238}\text{U}$ . Поэтому лишь небольшая часть (менее 1%) энергетического потенциала природного урана реализуется в текущем ядерном топливном цикле. Оставшиеся после изготовления топлива миллионы тонн обедненного урана, содержащие до 0.2 мас. %  $^{235}\text{U}$ , хранятся в виде летучего выше 50°C гексафторида ( $\text{UF}_6$ ) и полученного в результате его конверсии диоксида урана.

Добыча урана в мире в 2020–2021 годах составляла 47000 т, остальное получали из складских запасов и от переработки отработавшего топлива, ОЯТ. К 2040 г. потребность АЭС в природном уране оценивается в 60–110 тыс. т (Uranium..., 2023). Существенное увеличение ресурсов ядерной энергетики связано с переходом к двухкомпонентной системе с реакторами на медленных (тепловых) и быстрых нейтронах и замкнутым топливным циклом, то есть с переработкой ОЯТ. Это позволит использовать для выработки электроэнергии не только  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ , но также и  $^{238}\text{U}$ , с долей 99.3% в природной смеси изотопов.

Из реакторов гражданской ядерной энергетики с 1954 по 2016 год выгружено около 390000 т ОЯТ, а треть его уже переработана (Status..., 2022). В настоящее время, с учетом объемов наработки, масса ОЯТ в мире приближается к 300000 т, в России хранится почти 25000 т ОЯТ реакторов ВВЭР и РБМК (Шестой..., 2020). Переработка ОЯТ ведет к появлению больших объемов радиоактивных отходов (РАО), включая высокоактивные (ВАО), которые содержат долгоживущие продукты деления ( $^{79}\text{Se}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{129}\text{I}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ), актиниды (Np, Am, Cm) и др. Объем твердых ВАО в 2016 г. оценивался как 29000 м<sup>3</sup> (Status..., 2022) или около 70000 т (не считая ОЯТ). Проблемой обращения с ВАО в мире занимаются более 70 лет, их предлагается включать в устойчивые стеклообразные или минералоподобные матрицы для захоронения. В нашей стране эта работа началась позже, ее активизация связана с созданием нового направления “радиогеоэкология”, инициированного академиком Н.П. Лаверовым. В статье (Лаверов и др., 1991) отмечено, что захоронение

РАО в геологические формации – это крупная междисциплинарная проблема. Основная задача радиогеоэкологии определена как обоснование безопасного захоронения таких отходов в геологической среде. Она решается созданием мультibarьерной системы, и первым из таких барьеров является консервирующая матрица отходов. Главные результаты первых двадцати лет изучения этой проблемы в ИГЕМ РАН обобщены в работе (Лаверов и др., 2008), которая до сих пор сохраняет актуальность.

*История и современное состояние обращения с высокоактивными отходами в России*

Проблема изоляции отходов ядерной энергетики уже почти 70 лет находится в центре внимания специалистов многих стран. Такие отходы в больших объемах возникают в ходе переработки ОЯТ при извлечении U и Pu для последующего использования (Глаголенко и др., 1997; Копырин и др., 2006; Лаверов и др., 2008). В мире промышленная иммобилизация ВАО в В–Si стекла ведется с 1978 г. (Donald, 2010; Jantzen, 2011), в России для этого с 1987 г. применяется Na–Al–P стекломатрица (Поляков и др., 1994; Глаголенко и др., 1997; Ремизов и др., 2018; Богатов и др., 2021). В мире имеется 35000–40000 т высокоактивного стекла при массовом соотношении количеств В–Si и Al–P стекломатриц, равном 4 : 1. Остеклованные ВАО (отходы 1-го и 2-го классов по Российской классификации) планируется размещать в кристаллических породах на глубинах 0.5–1 км в глубоком шахтном хранилище (ПГЗРО). В нашей стране реализуется проект “Енисейский” в Красноярском крае, нацеленный на сооружение ПГЗРО в гранитогнейсах (Laverov et al., 2016).

При регенерации ОЯТ происходит перераспределение радионуклидов относительно состава ОЯТ (Копырин и др., 2006; Богатов и др., 2021). В первом цикле экстракционной переработки из ВАО извлекается 99.9% U, 99.5% Pu и 98% Np (Глаголенко и др., 1997). Остекловывание жидких ВАО ведется на ПО “Маяк” в одну стадию в керамических печах ЭП-500 (Поляков и др., 1994; Вашман и др., 1997; Полуэктов и др., 2005; Ремизов и др., 2018). Температура варки Na–Al–P стекла 910–1135°C, его состав лежит в пределах, мас. %: 23–26 Na<sub>2</sub>O, 14–19 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 52–54 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Доля отходов в матрице, с учетом Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, равна 21–26 мас. %, а на продукты деления и актиниды приходится 3–5 мас. %. Начиная с 1987 года на ПО “Маяк” работали 5 печей, на 4-х первых установках получено 6200 т остеклованных ВАО с активностью 640 млн Ки. Печь ЭП-500/5 производительностью до 800 т стекла/год запущена в декабре 2016 г., после окончания ее эксплуатации для остекловывания отходов будут применяться малогабаритные демонтируемые плавители (Баторшин и др., 2013).

К настоящему времени в печи ЭП-500-5 получено 1600 т стекла (Богатов и др., 2021), а общая масса остеклованных отходов, хранящихся на ПО “Маяк”, приближается к 8000 т. Отверждение 15 тыс. м<sup>3</sup> жидких ВАО и шламов добавит еще 5000–6000 т высокоактивного стекла (Баторшин и др., 2013, 2015). Для этого предполагается использовать индукционный плавитель с “холодным” тиглем, ИПХТ (Баторшин и др., 2015). В итоге общее количество стекла приблизится к 14000 т, что на 30% превысит проектную вместимость будущего подземного хранилища “Енисейский” (Laverov et al., 2016).

Из-за ограничений по радиационному разогреву и термостойкости стекломатрицы ВАО на 1 т ОЯТ образуется 1.2–1.8 т стекла (Власова и др., 2017; Ремизов и др., 2018), что в 4–5 раз выше значений, чем при использовании В–Si матрицы, содержащей 18–20 мас. % ВАО. Недостаток технологии заключается в малом ресурсе работы печей ЭП-500 (3–5 лет). При больших габаритах (9.5 × 4 × 3 м) производительность печи всего 85 кг стекла/час. После вывода из эксплуатации ее демонтаж представляет очень сложную задачу, так как в печи остается высокоактивное стекло. Проблемы, связанные с остекловыванием жидких ВАО, и пути их решения, отражены во многих статьях (Глаголенко и др., 1997; Баторшин и др., 2013, 2015; Ремизов и др., 2018).

Особенность Na–Al–P-стекол – их низкая термостойкость, что ограничивает содержание в матрице теплогенерирующих компонентов ВАО (<sup>90</sup>Sr, <sup>137</sup>Cs). Фазы AlPO<sub>4</sub> и Na<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> образуются из расплава при остывании со скоростью менее 30°С в час (Вашман и др., 1997). Нагрев при 500°С неактивного стекла вызвал его частичную кристаллизацию с образованием фаз Na<sub>3</sub>(Al,Fe)<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> и фосфата РЗЭ. После выдержки 150 ч при 450°С в стекле найдены Na<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, AlPO<sub>4</sub>, NaPO<sub>3</sub>, (Fe,Cr)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Центры их кристаллизации – металлические и оксидные фазы низкорастворимых элементов ВАО (Ru, Rh, Pd, Fe, Cr и Ni).

После кристаллизации стекла скорость выщелачивания элементов вырастет в десятки и сотни раз (Вашман и др., 1997; Юдинцев и др., 2020). На поведение РЗЭ это не оказывает заметного влияния из-за их вхождения в монацит. В документах (ГОСТ Р 50926-96; НП-093-14; НП-019-15) определены требования к остеклованным отходам, однако стекло неизбежно раскристаллизуется со временем, чему способствует его нагрев из-за распада радионуклидов.

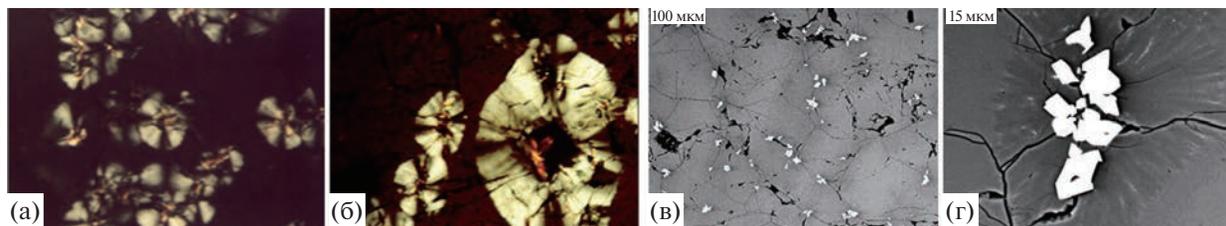
### *Перспективные направления в области обращения с высокоактивными отходами*

Сооружение современного высокопроизводительного комплекса переработки ОЯТ и отверждения ВАО – ключевое условие перехода к двухкомпонентной ядерной энергетике, функционирующей в режиме замкнутого топливного цикла. Его задача – сокращение объема высокоактивных отходов, подлежащих глубинному захоронению. Прогресс в решении этой проблемы связан с сепарацией ВАО на группы сходных по свойствам элементов. Одна из таких групп представлена фракцией трехвалентных редких земель (РЗЭ) и малых актинидов (МА – Am, Cm). Редкие земли представлены, в основном, стабильными изотопами, актиниды определяют долгосрочную опасность и вносят существенный вклад в тепловыделение ВАО. Приемы выделения РЗЭ – МА фракции испытаны на реальных жидких отходах переработки ОЯТ и уже готовы к практическому использованию (Копырин и др., 2006; Юдинцев, 2021).

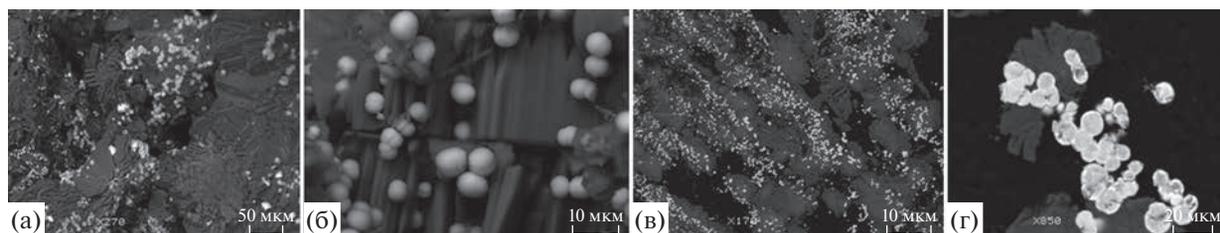
На единственной в мире промышленной установке фракционирования жидких ВАО на ПО “Маяк” с 1996 по 2003 год переработано 1620 м<sup>3</sup> жидких ВАО с активностью 55 млн Кюри. Нуклиды <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs извлекали хлорированным дикарбонилдом кобальта и включали в стекло, РЗЭ и трансплутониевые элементы (ТПЭ) осаждали в виде оксалатов (Копырин и др., 2006; Логунов и др., 2013). Стоимость переработки ВАО выросла на 5%, издержки на остекловывание снизились на 60%. Для иммобилизации концентрата РЗЭ – ТПЭ предложен монацит (Rovnyi et al., 2004) с высокой стойкостью при выщелачивании. После выделения <sup>90</sup>Sr и <sup>137</sup>Cs на ПО “Маяк” образовалось 117 м<sup>3</sup> раствора состава (г/л): Nd – 0.5, Sm – 0.3, La – 0.2, Pr – 0.15, Gd – 0.03, Y – 0.05, U – 0.5, Pu – 0.005, Al – 5.0, Fe – 2.5, Si – 2.0, Mn – 0.7, Cr – 0.5, Ni – 0.4, Ca – 0.2, Mg – 0.1, ТПЭ представлены <sup>241</sup>Am и <sup>244</sup>Cm. Добавлением к раствору щавелевой кислоты осаждались оксалаты РЗЭ и ТПЭ с удалением до 90% Ce и La, 95% Pr, Pm, Nd и Sm, 98% Y, Gd, Ee, Am и Cm, 88% Pu. Осадок переводили в порошок ортофосфата РЗЭ и спекали с получением монацитово-керамики. Монацит, как матрица актинидов, изучен в большом числе публикаций (Boatner, 2002; Омеляненко и др., 2007; Dacheux et al., 2013). Его образование при кристаллизации фосфатных стекол с РЗЭ позволяет использовать для изоляции отходов РЗЭ–МА фракции монацитовые стеклокерамики.

### *Образование монацита в алюмофосфатном стекле с имитаторами ВАО (РЗЭ, U)*

Образцы получены плавлением двух оксидно-фосфатных смесей в алундовых тиглях в электропечи при 1000°С (далее АФ-1) или 1200°С (АФ-2).



**Фиг. 3.** Стекло АФ-1 после нагрева 4 ч при 500°С: фотографии в оптическом микроскопе, николи скрещены, увеличение в 60 (а) и 200 (б) раз (стекло – темное, сферолиты Na–Al–Р фаз – светлое, монацит – желтое). СЭМ-изображение (в, г) сферолитов фосфатов (темно-серое) вокруг кристаллов монацита (белое) в остаточном стекле (светло-серое). Черное – поры.



**Фиг. 4.** Поверхность раскристаллизованного стекла АФ-2 до (а–б) или после (в–г) полировки. Светлое – монацит, темное – Na–Al фосфаты, черное – поры. Метки равны 50 (а), 10 (б), 100 (в) и 20 (г) мкм.

Расчетный состав образца АФ-1: 21.0% Na<sub>2</sub>O, 17.0% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 50.0% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 10.0% Ln<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Ln = La + Ce + Nd), 5.0% продукты деления (MoO<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>, BaO) и коррозии (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, NiO, MnO); образца АФ-2: 17.0% Na<sub>2</sub>O, 15.0% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 6.0% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 50.0% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 1.0% NiO, 3.0% Cs<sub>2</sub>O, 2.0% SrO, 5.0% Ln<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Ln = Ce + Nd) и 3.0% UO<sub>2</sub>. Имитаторами элементов ВАО служили Cs, Sr, Ce, Nd, Ni, Mo, а также U. Затем стекла нагревали 4 ч на воздухе при 500°С (АФ-1) или сутки при 300°С на воздухе либо в автоклаве в парах воды с влажностью 70% (АФ-2). Образцы изучали рентгенофазовым анализом (РФА), в оптическом и сканирующем электронном микроскопах (СЭМ/ЭДС). Образец АФ-1 сложен стеклом и фосфатом РЗЭ, монацитом (фиг. 3), который образуется из-за превышения содержания РЗЭ над растворимостью в расплаве, оцениваемой в 2–3 мас. % (Вашман и др., 1997; Матюнин, 2000). Зерна монацита имеют размеры до 20 микрон и часто образуют сростки. Фракционирование РЗЭ резко смещено в пользу

монацита (табл. 1), коэффициент распределения,  $K_p = C_{pзз} \text{ монацит} / C_{pзз} \text{ стекло}$ , составляет 30. Нагрев 4 ч при 500°С ведет к появлению фаз алюмофосфатов вокруг кристаллов монацита, которые служат центрами кристаллизации (фиг. 3а–б). В составе этих сферолитов РЗЭ отсутствуют.

Стекло АФ-2 однородно (табл. 2), суточный нагрев при 300°С в “сухих” условиях не привел к каким-либо его изменениям. Для ускорения кристаллизации стекло обработали в автоклаве нагретым паром с влажностью 70%. Жидкая фаза в опыте отсутствует, а поэтому состав образца не меняется, а происходит кристаллизация стекла с образованием монацита и двух Na–Al–Fe фосфатов несколько различного состава (фиг. 4, табл. 2). Монацит образует сферические выделения диаметром от 1–2 до 20 микрон, в нем имеются высокие количества Sr и U (табл. 2). Вхождение урана происходит по реакции  $2PЗЭ^{3+} = Sr^{2+} + U^{4+}$ . Для монацита типичны обмены с участием двух- и четырехвалентных катионов, такая разность монацита

**Таблица 1.** Составы (мас. %) стекла (1), монацита (2) и сферолитов (3) в образце АФ-1

Фаза	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MeO <sub>2-x</sub>	SrO	ZrO <sub>2</sub>	MoO <sub>3</sub>	Cs <sub>2</sub> O	BaO	Ln <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
1	24.0	17.2	47.8	0.8	0.8	2.9	1.4	0.9	0.8	2.4
2	<по	<по	27.9	<по	0.5	<по	<по	0.6	0.3	72.1
3	25.5	19.1	51.3	1.4	<по	<по	0.4	0.5	0.6	0.6

Примечание. Me – Cr, Mn, Fe, Ni; Ln – La, Ce, Nd; по – предел обнаружения (0.3–0.5 мас. %).

**Таблица 2.** Составы исходного стекла АФ-2 и фаз, образованных после его обработки паром

Фаза	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	SrO	Cs <sub>2</sub> O	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	UO <sub>2</sub>
Стекло <sup>1</sup>	17.4	14.4	50.4	5.5	1.1	2.0	2.5	2.3	1.9	2.5
Фосфат-1	22.9	19.2	53.1	4.8	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.
Фосфат-2	14.2	14.4	50.4	10.1	7.0	2.8	1.1	н.о.	н.о.	н.о.
Монацит	н.о. <sup>2</sup>	2.0 <sup>3</sup>	32.1	н.о.	н.о.	11.5	н.о.	20.6	17.9	15.9

Примечание. <sup>1</sup>Среднее по 5 участкам размером 200 × 200 мкм, <sup>2</sup>Не обнаружен (<0.3–0.5 мас. %). Точность анализа 3–5 отн. %.  
<sup>3</sup>Вероятный захват Na–Al фосфата при анализе.

с высоким содержанием двух- и четырехзарядных катионов известна как минерал чералит.

### О фосфатных стеклах с РЗЭ и монацитовых стеклокерамиках

Изучалась растворимость РЗЭ (Матюнин, 2000; Stefanovsky et al., 2019a, 2019b; Frolova et al., 2022) и актинидов (Вашман и др., 1997; Данилов и др., 2018) в Na–Al–Fe–P–расплавах. Так как кристаллохимическим аналогом трехвалентных актинидов (Am, Cm) и РЗЭ–МА фракции в целом служат легкие РЗЭ (Юдинцев, 2021), то наибольший интерес представляют данные о поведении La, Nd, Sm. Их растворимость в алюмо–(железо)–фосфатном расплаве при 1000°C составляет, в мас. %: 1.5–1.7 (La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 2.5–2.6 (Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) или 3.7–3.8 (Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (Матюнин, 2000).

В работах (Данилов и др., 2018; Стефановский и др., 2018; Stefanovsky et al., 2017, 2018, 2019a, 2019b) исследованы алюмофосфатное (SAP) и алюмо–железофосфатное (SAIP) стекла с РЗЭ и актинидами (U, Np, Pu, Am). Их составы (мол. %/мас. %): 40/24.3 Na<sub>2</sub>O, 20/20.0 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 40/55.7 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (SAP); 40/23.0 Na<sub>2</sub>O, 10/9.5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 10/14.8 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 40/52.7 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (SAIP). Содержание РЗЭ менялось от 1 до 20 мас. %, актинидов – от долей процента (Np, Pu, Am) до 50% (U). Стекла получали плавлением в течение 0.5–6 ч при 1000–1300°C и сливом на плиту для закалки либо охлаждением по режиму, аналогичному остыванию блока в 200-литровом контейнере на ПО “Маяк”. При содержании в стекле до 5 мас. % РЗЭ монацит не образуется. При медленном охлаждении в стекле образуются фосфаты Na, Al (или Fe–Al) и РЗЭ (монацита), скорость выщелачивания элементов возрастает в 5–10 раз и составляет 10<sup>–6</sup> г/(см<sup>2</sup> сут) (Stefanovsky et al., 2017). РЗЭ-имитаторы актинидов при кристаллизации концентрируются в монаците, коэффициент их распределения между монацитом и стеклом составляет 45–70. Определены (Стефановский и др., 2018) фазовый состав стекломатриц с РЗЭ (La, Ce, Eu, Gd), их структура и устойчивость в воде. Введение в стекла до 5 мас. % оксидов лантанидов (Ln) не вызывает кристаллизации фаз при закалке (кроме La-со-

держашего стекла) и не оказывает заметного влияния на их структуру и гидролитическую устойчивость. После медленного отжига стекла SAP кристаллизуются с выделением Al–P, Na–Al–P, Ln–P (монацит) и Na–Ln–P фаз, в случае Gd – еще и оксида Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Плавлением от 1 до 6 ч при 1000 или 1200°C получены алюмо–фосфатное (SAP) и алюмо–железо–фосфатное (SAIP) стекла с 9 мас. % оксидов РЗЭ. Часть расплава закачивали, остальной объем остывал в печи. Закаленные стекла гомогенны, остывавшие в печи, кроме стекла, содержат фосфаты Al, Na–Al и РЗЭ (монацит). Изучение устойчивости образцов (вода, фракция 0.071–0.125 мм, 90°C, 7 суток) выявило увеличение скорости выщелачивания из частично закристаллизованных стекол в 5–10 раз по сравнению с закаленным. Включение 9 мас. % РЗЭ не ухудшает устойчивость в воде закаленных стекол в отношении Na, Al и P. Для отоженных стекол скорости выщелачивания растут в 2–40 раз, что обусловлено образованием фосфатов и алюмофосфатов натрия. Выщелачивание РЗЭ остается на низком уровне из-за образования монацита. В случае кристаллизации стекла он будет удерживать РЗЭ и не допустит ухудшения свойств матрицы при хранении. Скорости выщелачивания на 30-е сутки равны, г/(см<sup>2</sup> сут): 3.5 × 10<sup>–8</sup>, 3.4 × 10<sup>–9</sup> и 6.3 × 10<sup>–9</sup> для Np, Pu и Am соответственно, что ниже нормативных значений – не более 10<sup>–7</sup> г/(см<sup>2</sup> сут) для <sup>239</sup>Pu. Более высокие скорости выщелачивания Np, чем Pu и Am связаны, вероятно, с его присутствием, по крайней мере частично, в виде иона NpO<sub>2</sub><sup>+</sup> (Данилов и др., 2018).

Согласно (Stefanovsky et al., 2019b), стекла SAP ( $T_{пл.} = 1000^\circ\text{C}$ ) и SAIP ( $T_{пл.} = 1200^\circ\text{C}$ ) с 10 мас. % РЗЭ не содержат кристаллических фаз, и только в образце с La имеются следы монацита (LaPO<sub>4</sub>). При обжиге не содержащее РЗЭ стекло SAP частично кристаллизуется с выделением AlPO<sub>4</sub> и β-Na<sub>6</sub>Al<sub>3</sub>(P<sub>2</sub>O<sub>7</sub>)<sub>3</sub>. В стекле с La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> главные фазы – AlPO<sub>4</sub> и монацит. В образце с Ce<sub>2</sub>O<sub>3</sub> кристаллических фаз, кроме AlPO<sub>4</sub>, не обнаружено. Введение CeO<sub>2</sub> приводит к появлению церианита, монацита и Na<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>. В отоженных образцах с оксидами Pr и Nd содержатся AlPO<sub>4</sub>, монацит и следы

$\text{Na}_3\text{Al}_2(\text{PO}_4)_3$ . В образцах с Sm, Eu, Gd обнаружен ортофосфат  $\text{Na}_3\text{P}_3\text{Э}(\text{PO}_4)_2$ . Введение до ~10 мас. % оксидов РЗЭ в стекла не влияет на выщелачивание Na, Al, Fe, P. Скорости выщелачивания РЗЭ равны  $10^{-7}$ – $10^{-6}$  г/(см<sup>2</sup> сут). Закаленные стекла SAIP менее растворимы, чем SAP, отожженные образцы более устойчивы, чем закаленные за счет включения РЗЭ в монацит. После отжига выход Na и P из стекла SAP увеличивается в 2–15 раз, скорости выщелачивания Al, Fe и РЗЭ не меняются.

Стеклокерамика, содержащая до 20 мас. % оксидов (РЗЭ), получена путем плавки при 1250°C и последующей закалкой или медленным охлаждением до комнатной температуры (Stefanovsky et al., 2018). Безжелезистая стеклокерамика сложена стеклом и небольшим количеством  $\text{AlPO}_4$  и монацита. Железосодержащая стеклокерамика при низком содержании РЗЭ (5–10 мас. %) состояла из стекла, небольших количеств монацита и фосфата Na–Al–Fe, при высоком (15–20 мас. %) – из ортофосфата Na–Al–Fe, монацита и стекла. Медленно охлажденные образцы содержат больше фаз, чем закаленные. Скорости выщелачивания Na, Al, Fe и P составляют  $10^{-5}$ – $10^{-7}$  г см<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>, для РЗЭ их величины меньше  $10^{-5}$  г см<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>.

Свойства Na–Al–(Fe)–P стекол с 10 мас. % смеси оксидов состава  $(\text{La}_{0.57}\text{Ce}_{0.36}\text{Nd}_{0.93})\text{O}_3$  изучены в статье (Frolova et al., 2022). Образцы готовили плавлением 1 ч при 1200°C и быстрой закалкой. В них имеется монацит, растворимость РЗЭ в стеклах в пределах точности анализа одинакова, мас. %: 0.8–0.9  $\text{La}_2\text{O}_3$ , 0.7–0.8  $\text{CeO}_2$ , 1.9–2.0  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ , в сумме 3.5 мас. %. Основная часть РЗЭ находится в монаците, который образует зерна размером до 10 микрон. Значения  $K_p$  между монацитом и стеклом равны: 17–20 (Ce), 17–21 (La) и 13–17 (Nd).

При обращении с ВАО важное значение имеет технология иммобилизации в матрицу. Существуют ограничения при использовании керамических печей для отверждения ВАО. Этим недостатком лишена технология высокочастотной индукционной плавки в холодном тигле (ИПХТ) при нагреве электромагнитным полем от высокочастотного генератора. Ее достоинства: отсутствие электродов, огнеупоров и контакта расплава со стенками тигля из-за не расплавившегося слоя шихты, а перемешивание расплава вихревыми токами позволяет достичь высоких температур, удельной производительности и качества конечного продукта. Поэтому ИПХТ является эффективным приемом получения стекол, керамики и стеклокерамик для изоляции ВАО, в том числе с монацитом. Работы по ИПХТ ведутся во Франции, в России, США, Великобритании, Южной Корее, Индии. Подходы различаются выбором рабочих частот, размером и возможностью опорожнения тигля и рядом других особенностей.

Французский вариант предусматривает низкие частоты (200–300 кГц) и тигли диаметром до 1 м, в российском – частота составляет 1760 кГц при диаметре тигля до 0.5 м. На заводе во Франции с 2011 года для остекловывания ВАО используется тигель диаметром 650 мм, генератор с частотой 200 кГц и мощностью 600 кВт. ИПХТ считается перспективной технологией для синтеза матриц отходов высокого и среднего (CAO) уровня активности, в том числе актинидной фракции (Vlasov et al., 1987; Kushnikov et al., 1997; Smelova et al., 1997; Sobolev et al., 1997; Demine et al., 2001), CAO от работы АЭС, очистки урана и др. Пионером изготовления матриц методом ИПХТ в нашей стране был В.И. Власов (ВНИИНМ, МосНПО “Радон”). ИПХТ используется во ФГУП “Радон” для остекловывания жидких CAO на установке с частотой 1760 кГц и мощностью 160 кВт. При загрузке шихты в виде пасты с влажностью 22 мас. % производительность по стеклу равна 25 кг/ч. С 1998 г. переработано 15000 м<sup>3</sup> жидких CAO, получено 50 т стекла. ИПХТ активно развивается в Госкорпорации Росатом (ВНИИНМ, ВНИИХТ, Радиевый Институт, ПО “Маяк”) Российской академии наук (ИФХЭ), Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете (ЛЭТИ). Использование ИПХТ позволяет увеличить температуру расплава с 1000°C до 1200–1300°C и растворимость РЗЭ в нем. Конвективное перемешивание расплава препятствует осаждению из расплава кристаллических фаз (монацита) и нарушению однородности матрицы. Поэтому содержание фракции РЗЭ-актинидов может быть выше растворимости элементов в расплаве и достигать 10–20 мас. % (Kushnikov et al., 1997). Результаты исследований показали перспективность использования ИПХТ для остекловывания жидких и твердых отходов с высокой производительностью и надежностью (Лопух и др., 2022). Методом ИПХТ получены стекла, керамики на основе пироклора и муратаита, стеклокерамики с фазами цирконолита, граната или бритолита, содержащие имитаторы РЗЭ-актинидной и актинидной фракций ВАО (Смелова и др., 2000; Лаверов и др., 2011, 2013; Юдинцев и др., 2015; Стефановский, Юдинцев, 2016; Stefanovsky et al., 2016, 2019; Юдинцев и др., 2021). Во ВНИИНМ создан малогабаритный плавильщик с холодным тиглем с рабочей температурой в 1500°C, достаточной для синтеза различных типов матриц, в том числе на фосфатной основе с монацитом. С 2003 года работает установка с тиглем диаметром 380 мм, высотой 800 мм и с производительностью 25 кг матрицы в час. В ней учтены требования по дистанционным условиям эксплуатации, замене и ремонту оборудования, а также демонтажу установки.

Иммобилизация ВАО, совмещающая получение гранулированного прекурсора и его плавку в



**Фиг. 5.** Установка для грануляции (а); гранулы шихты (б, в); “холодный” тигель (г) и вся установка ИПХТ (д); подготовленные для изучения образцы керамических матриц (е, ж).

ИПХТ с образованием компактной формы, рассмотрена в работе (Мельникова и др., 2023). Этот метод позволяет снизить уносы, уменьшить коррозионное воздействие из-за образования гарнисажа, повысить эффективность получения матрицы. Прекурсор получали на демонстрационном грануляторе (фиг. 5а), в который загружалась смесь, отвечающая составу матрицы. Затем на поверхность подавался имитатор жидких ВАО с формированием окатышей. Их размер и прочность зависели от состава матричной смеси и температуры, задаваемой в пределах 200–270°C. Скорость вращения борта тарелки 1.54 м/с, угол наклона к вертикали 40°. Гранулят (фиг. 5б, в) порциями загружали в тигель (фиг. 5г, д), после гомогенизации расплава установку отключали и происходила кристаллизация матрицы (фиг. 5е, ж). Плавлением гранулированной шихты в ИПХТ при 1600°C получены 2 образца массой каждый 2 кг. Параметры изготовления образцов выбраны максимально близкими к реальным технологиче-

ским условиям, что обеспечивает их соответствие промышленному продукту.

Реализация стратегии многократной переработки ОЯТ, извлечения Pu, Np, Am и Cm для трансмутации потребует строительства и эксплуатации крупных заводов по переработке ОЯТ, для фракционирования ВАО, дистанционного изготовления топлива и реакторов для трансмутации. Для использования ресурсов урана и сокращения опасности малых актинидов необходимы сооружение и эксплуатация ряда сложных и дорогих технологий (реакторы, установки по переработке и изготовлению топлива). Быстрое внедрение такой программы в настоящее время маловероятно, поскольку это требует огромных затрат и решения ряда технологических проблем. Она представляет интерес на горизонте в столетие (Merits..., 2023), тогда как с учетом готовности имеющихся технологий задачи выделения РЗЭ-МА фракции и ее иммобилизации в матрицу можно осуществить в короткие сроки (до 10 лет).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расширение минерально-сырьевой базы урана требует новых подходов к совершенствованию прогнозно-поискового комплекса, особенно в связи с исчерпанием легко открываемых приповерхностных объектов и необходимостью направления геологоразведочных работ на выявление скрытых, слепых месторождений, а также с оценкой минерально-сырьевого потенциала территорий Дальнего Востока и Арктического региона с весьма сложными ландшафтно-геоморфологическими и климатическими условиями. Для выделения и обоснования поисковых площадей требуются разномасштабные прогнозно-минералогические исследования, которые направлены на выявление определенного геолого-промышленного типа месторождений (Машковцев, Петров, 2023). Эти исследования целесообразно проводить с использованием минерально-системного подхода, который ориентирован на создание генетических моделей месторождений (моделей урановых минеральных систем) с акцентом на состав и свойства рудоносных флюидов, что открывает новую страницу в поисках и разведке минеральных ресурсов для ядерной энергетики России и создает хорошие перспективы для устойчивого развития начальной стадии ядерного топливного цикла.

Ядерная энергетика – это единственная низко-углеродная технология для постоянной генерации больших объемов электрической и тепловой энергии (Energy..., 2022; Meeting..., 2022), что определяет ее огромную роль в снижении выбросов парниковых газов и борьбе с изменениями климата. Атомная генерация электроэнергии в нашей стране позволяет снизить годовые выбросы CO<sub>2</sub> более чем на 100 млн т (при использовании углеводородного топлива на 1 кВт ч генерируется около 500 г CO<sub>2</sub>). Однако в ядерном топливном цикле образуются радиоактивные материалы – ОЯТ и отходы его переработки, в том числе наиболее опасные ВАО с долгоживущими трансурановыми актинидами. Использование делящихся материалов в реакторах на быстрых нейтронах более чем на 2 порядка увеличивает ресурсы атомной энергетики и позволяет вовлечь в топливный цикл накопленные запасы урана, обедненного по <sup>235</sup>U. Образующиеся ВАО отверждаются в В–Si или Al–P стекла, что не вполне отвечает требованиям безопасности и эффективности. В частности, низкое содержание отходов (3–20 мас. %) ухудшает использование пространства глубинного хранилища. Со временем стекла кристаллизуются с увеличением растворимости и образованием коллоидов с высокой способностью к миграции. Решение проблемы ВАО связано с разделением их на группы радионуклидов, многие из этих приемов испытаны на

реальных отходах переработки ОЯТ. Полученные фракции, включая группу РЗЭ-актинидов, можно включать в стекла, керамики или стеклокристаллическую матрицу с монацитом. Использование для ее изготовления ИПХТ позволит повысить загрузку отходами за счет увеличения температуры процесса и растворимости этих элементов в фосфатных расплавах. В отличие от керамических печей-плавителей, где образование в расплаве монацита может привести к нежелательным последствиям из-за его осаждения и аккумуляции в донной части, вихревые конвективные токи установки ИПХТ будут обеспечивать перемешивание расплава. Это делает ИПХТ перспективным способом изготовления стеклокерамик с фазой монацита. Кристаллизация стекла с образованием монацита происходит на 100–150°C выше температуры стеклования. Последняя, в зависимости от состава стекла, оценивается как 450–500°C, что определяет оптимальный интервал нагрева стекла в 500–700°C. Лимитирующим фактором для загрузки матриц отходами выступает тепловыделение в связи с распадом РЗЭ (Eu, Sm), а затем малых актинидов (Am, Cm). Оценки нагрева блока в зависимости от содержания отходов, габаритов матрицы и времени выдержки до захоронения имеются в работах (Юдинцев и др., 2021; Ojovan, Yudinsev, 2023). Эти значения необходимо будет в дальнейшем проверить в опытах по раскристаллизации при термической обработке стекол, содержащих РЗЭ.

В силу ограниченного объема в статье затронуты лишь некоторые важные аспекты воспроизводства минерально-сырьевой базы урана и обращения с высокоактивными отходами. Интересующую эту темой читателю можно рекомендовать обзоры и статьи, приведенные в списке литературы.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено по теме НИР государственного задания ИГЕМ РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева О.В., Петров В.А., Полуэктов В.В. Мезозойские кислые магматиты Юго-Восточного Забайкалья: петрогеохимия, связь с метасоматизмом и рудообразованием // Геология рудн. месторождений. 2020. Т. 62. № 1. С. 76–104.
- Баторшин Г.Ш., Иванов И.А., Козлов П.В., Мокров Ю.Г. Основные стратегические решения по модернизации системы обращения с РАО на ФГУП “ПО “Маяк” // Вопросы радиационной безопасности. 2013. № 3. С. 3–11.
- Баторшин Г.Ш., Ремизов М.Б., Козлов П.В., Логунов М.В., Кустов С.В. Технология переработки ядерного наследия ФГУП “ПО “Маяк” – накопленных высокоактивных гетерогенных отходов // Вопросы радиационной безопасности. 2015. № 1. С. 3–10.

- Богатов С.А., Блохин П.А., Уткин С.С., Дорофеев А.Н., Киселёв А.И., Козлов П.В., Лукин С.А., Ремизов М.Б., Семёнов М.А.* Усредненные оценки удельной активности и тепловыделения остеклованных высокоактивных отходов, накопленных на ФГУП “ПО “Маяк” // Вопросы радиационной безопасности. 2021. № 3. С. 1–12.
- Бортников Н.С., Петров В.А., Машковцев Г.А., Печенкин И.Г.* Создание минерально-сырьевой базы атомной отрасли // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. № 39. М.: ФГБУ “ВИМС”, 2021. 23 с.
- Бойцов А.В.* Развитие мировой урановой промышленности – вызовы времени // Сборник докладов пятого международного симпозиума “Уран: геология, ресурсы, производство”. 23–24.11.2021. М.: ФГБУ “ВИМС”, 2021. С. 11–22.
- Вашман А.А., Демин А.В., Крылова Н.В., Кушиников В.В., Матюнин Ю.И., Полуэктов П.П., Поляков А.С., Тетерин Э.Г.* Фосфатные стекла с радиоактивными отходами. М.: ЦНИИАтоминформ, 1997. 172 с.
- Власова Н.В., Ремизов М.Б., Козлов П.В., Беланова Е.А.* Исследование химической устойчивости алюмофосфатных стекол, имитирующих отвержденные ВАО, подлежащие возврату зарубежным поставщикам ОЯТ // Вопросы радиационной безопасности. 2017. № 3. С. 32–37.
- Глаголенко Ю.В., Дзекун Е.Г., Ровный С.И., Сажнов В.К., Уфимцев В.П., Брошевицкий В.С., Лаптев Г.А., Основин В.И., Захаркин Б.С., Смелов В.С., Ненарокомов Э.А., Никипелов Б.В.* Переработка отработавшего ядерного топлива на комплексе РТ-1: история, проблемы, перспективы // Вопросы радиационной безопасности. 1997. № 2. С. 3–12.
- ГОСТ Р 50926-96. Отходы высокоактивные отвержденные. Общие технические требования. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1996. 6 с.
- Государственный доклад “О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году”. М.: ФГБУ “ВИМС”, 2022. 626 с.
- Данилов С.С., Стефановский С.В., Стефановская О.И., Винокуров С.Е., Мясоедов Б.Ф., Тетерин Ю.А.* Алюмо(железо)фосфатные стекла, содержащие редкоземельные и трансураниевые элементы: фазовый состав, состояние окисления Np и Pu, гидролитическая устойчивость // Радиохимия. 2018. Т. 60. № 4. С. 371–375.
- Копырин А.А., Карелин А.И., Карелин В.А.* Технология производства и радиохимической переработки ядерного топлива. М.: Атомиздат, 2006. 576 с.
- Лаверов Н.П.* Геологические условия формирования урановых месторождений в областях континентального вулканизма (на примере Срединного Тянь-Шаня). Дис. ... докт. г.-м.н. М.: ИГЕМ РАН, 1972.
- Лаверов Н.П., Канцель А.В., Лисицин А.К., Омеляненко Б.И., Пэк А.А., Сельцов Б.М., Филоненко Ю.Д.* Основные задачи радиогеоэкологии в связи с захоронением радиоактивных отходов // Атомная энергия. 1991. Т. 71. Вып. 6. С. 523–534.
- Лаверов Н.П., Величкин В.И., Омеляненко Б.И., Юдинцев С.В., Петров В.А., Бычков А.В.* Изоляция отработавших ядерных материалов: геолого-геохимические основы. М.: ИФЗ РАН, 2008. 280 с.
- Лаверов Н.П., Юдинцев С.В., Стефановский С.В., Омеляненко Б., Никонов Б.С.* Муратаитовые матрицы актинидных отходов // Радиохимия. 2011. Т. 53. № 3. С. 196–207.
- Лаверов Н.П., Омеляненко Б.И., Юдинцев С.В., Стефановский С.В., Никонов Б.С.* Стекла для иммобилизации отходов низкого и среднего уровней радиоактивности // Геология рудных месторождений. 2013. Т. 55. № 2. С. 87–113.
- Логунов М.В., Тананаев И.Г., Мясоедов Б.Ф.* Фракционирование ВАО: основные подходы и современное состояние // Труды Российской конференции “Фундаментальные аспекты безопасного захоронения РАО в геологических формациях”. Москва, 15–16 октября 2013. М.: Граница, 2013. С. 94–96.
- Лопух Д.Б., Вавилов А.В., Хоршев А.А., Скриган И.Н., Мартынов А.П.* Экспериментальные и теоретические исследования индукционных печей с холодными тиглями и донным нагревом для остекловывания радиоактивных отходов // Радиоактивные отходы. 2022. № 4 (21). С. 13–23.
- Матюнин Ю.И.* Локализация компонентов жидких высокоактивных отходов (РЗЭ, U и Pu) в фосфатных и боросиликатных стеклоподобных материалах. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата химических наук. М.: ВНИИНМ, 2000. 25 с.
- Машковцев Г.А., Гребенкин Н.А., Петрин А.В., Прохоров Д.А.* Основные направления геологоразведочных работ на уран // Сборник докладов. Пятый международный симпозиум “Уран: геология, ресурсы, производство”. 23–24.11.2021. М.: ФГБУ “ВИМС”, 2021. С. 71–90.
- Машковцев Г.А., Петров В.А.* Пути совершенствования научно-методических основ поисковых работ на твердые полезные ископаемые // Сборник докладов научно-практической конференции “Актуальные проблемы поисковой геологии”. 22–24.11.2022. М.: ФГБУ “ВИМС”, 2023. С. 195–208.
- Мельникова И.М., Каленова М.Ю., Шепин А.С., Юдинцев С.В.* Устойчивость в воде матриц редкоземельно-актинидной фракции высокордиоактивных отходов // Докл. РАН. 2023. Т. 508. № 2. С. 275–282.
- НП-093-14. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения // Ядерная и радиационная безопасность. 2015. № 3 (77). С. 59–82.
- НП-019-15. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности. Приказ Ростехнадзора от 13.09.2021 года № 299.
- Омеляненко Б.И., Лившиц Т.С., Юдинцев С.В., Никонов Б.С.* Природные и искусственные минералы – матрицы для иммобилизации актинидов // Геология рудн. месторождений. 2007. Т. 49. № 3. С. 173–193.
- Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В., Коваленко Д.В.* Ураноносные вулканогенные структуры: Стрельцовская (РФ), Сианшань (КНР) и МакДермитт (США). Сравнительный анализ петрологии кислых вулканитов и состава околорудных метасоматитов // Геология рудн. месторождений. 2022. Т. 64. № 1. С. 7–36.
- Полуэктов П.П., Суханов Л.П., Матюнин Ю.И.* Научные подходы и технические решения в области обращения с жидкими высокоактивными отходами // Рос-

- сийский химический журнал. 2005. Т. XLIX. № 4. С. 29–41.
- Поляков А.С., Борисов Г.Б., Моисеенко Н.И., Основин В.И., Дзекун Е.Г., Медведев Г.М., Бельтоков В.А., Дубков С.А., Филиппов С.Н. Опыт эксплуатации керамического плавителя ЭП-500/1р по остекловыванию жидких высокоактивных отходов // Атомная энергия. 1994. Т. 76. Вып. 3. С. 183–188.
- Пэк А.А., Мальковский В.И., Петров В.А. Минеральная система урановых месторождений Стрельцовской кальдеры (Восточное Забайкалье) // Геология рудн. месторождений. 2020. Т. 62. № 1. С. 36–54.
- Ремизов М.Б., Козлов П.В., Борисенко В.П., Дементьева И.И., Блохин П.А., Самойлов А.А. Разработка алгоритма оценки радионуклидного состава остеклованных ВАО ФГУП “ПО “МАЯК” для цели их безопасного захоронения // Радиоактивные отходы. 2018. № 3 (4). С. 102–110.
- Смелова Т.В., Крылова Н.В., Юдинцев С.В., Никонов Б.С. Силикатная матрица актинид-содержащих отходов // Докл. РАН. 2000. Т. 374. № 2. С. 242–246.
- Стефановский С.В., Юдинцев С.В. Титанаты, цирконаты, алюминаты и ферриты – матрицы для иммобилизации актинидов // Успехи химии. 2016. Т. 85. № 9. С. 962–994.
- Стефановский С.В., Стефановская О.И., Семенова Д.В. Фазовый состав и структура стекломатериалов на натрий-алюмофосфатной основе, содержащих оксиды редкоземельных элементов // Радиоактивные отходы. 2018. № 1 (2). С. 97–101.
- Тарханов А.В., Бугриева Е.П. Современное состояние мировой и российской урановой промышленности // Сборник докладов пятого международного симпозиума “Уран: геология, ресурсы, производство”. 23–24.11.2021. М.: ФГБУ “ВИМС”, 2021. С. 32–40.
- Шестой национальный доклад Российской Федерации о выполнении обязательств, вытекающих из Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами. Москва, 2020. 167 с.
- Юдинцев С.В., Стефановский С.В., Каленова М.Ю., Никонов Б.С., Никольский М.С., Коцеев А.М., Шенин А.С. Матрицы для иммобилизации отходов редкоземельно-актинидной фракции, полученные методом индукционного плавления в холодном тигле // Радиохимия. 2015. Т. 57. № 3. С. 272–282.
- Юдинцев С.В., Мальковский В.И. Первичные коллоиды при гидротермальном изменении алюмофосфатного стекла с имитаторами радионуклидов // Радиохимия. 2020. Т. 62. № 3. С. 258–270.
- Юдинцев С.В. Изоляция фракционированных отходов ядерной энергетики // Радиохимия. 2021. Т. 63. № 5. С. 403–430.
- Юдинцев С.В., Мальковский В.И., Каленова М.Ю. Тепловое поле скважинного хранилища радиоактивных отходов // Докл. РАН. 2021. Т. 498. № 2. С. 92–100.
- Boatner L.A. Synthesis, structure, and properties of monazite, pretulite, and xenotime // Rev. Mineral. Geochem. 2002. V. 48 (1). P. 87–121.
- Dacheux N., Clavier N., Podor R. Versatile monazite: Resolving geological records and solving challenges in materials science. Monazite as a promising long-term radioactive waste matrix: Benefits of high-structural flexibility and chemical durability // Amer. Mineral. 2013. V. 98. P. 833–847.
- Demine A.V., Krylova N.V., Polyektov P.P., Shestoporov I.N., Smelova T.V., Gorn V.F., Medvedev G.M. High level liquid waste solidification using a “cold” crucible induction melter // MRS Symp. Proc. V. 663. 2001. <https://doi.org/10.1557/PROC-663-27>.
- Descriptive uranium deposit and mineral system models. Vienna: IAEA, 2020. 328 p.
- Donald I.W. Waste immobilization in glass and ceramic based hosts: radioactive, toxic, and hazardous wastes. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd, 2010. 507 p.
- Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050. Vienna: IAEA, 2022. 148 p.
- Frolova A.V., Danilov S.S., Vinokurov S.E. Corrosion behavior of some glasses immobilized with REE in simulated mineralized solutions // Ceram. International. 2022. V. 48. P. 19644–19654.
- Fuchs K., Müller B. World stress map of the Earth: a key to tectonic processes and technological applications // Naturwissenschaften. 2001. №. 88. P. 357–371.
- Geological Classification of Uranium Deposits and Description of Selected Examples. Vienna: IAEA, 2018. 417 p.
- Jaeger J.C., Cook N.G.W. Fundamentals of Rock Mechanics. 3rd edition. London: Chapman and Hall, 1979. 593 p.
- Jantzen C.M. Development of glass matrices for high level radioactive waste // In: Handbook of advanced radioactive waste conditioning technologies. M.I. Ojovan (Ed.). Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2011. P. 230–292.
- Kushnikov V.V., Matyunin Yu.I., Smelova T.V., Demin A.V. Use of induction melter with a cold crucible (CCIM) for HLLW and plutonium immobilization // MRS Symp. Proc. V. 465. 1997. P. 55–64.
- Laverov N.P., Yuditsev S.V., Kochkin B.T., Malkovsky V.I. The Russian strategy of using crystalline rock as a repository for nuclear waste // Elements. 2016. V. 12. № 4. P. 253–256.
- Meeting climate change targets. The role of nuclear energy. Paris: NEA Publishing, 2022. 49 p.
- Merits and Viability of Different Nuclear Fuel Cycles and Technology Options and the Waste Aspects of Advanced Nuclear Reactors. Washington, DC: National Acad. Press. 2023. 314 p.
- Nafigin I.O., Ishmukhametova V.T., Ustinov S.A., Minaev V.A., Petrov V.A. Geological and mineralogical mapping based on statistical methods of remote sensing data processing of Landsat-8: a case study in the Southeastern Transbaikalia, Russia // Sustainability. 2022. V. 14. 9242. 25 p.
- Ojovan M.I., Yuditsev S.V. Glass, ceramic, and glass-crystalline matrices for HLW immobilisation // Open Ceramics. 2023. V. 14. 100355.
- Rovnyi S.I., Medvedev G.M., Aloy A.S., Koltsova T.I., Samoylov S.E. REE and TRU incorporation into monazite structure ceramics // MRS Symp. Proc. V. 824. 2004. P. 208–212.
- Skirrow R.G., Jaireth S., Huston D.L., Bastrakov E.N., Schofield A., van der Wielen S.E., Barnicoat A.C. Uranium mineral systems: Processes, exploration criteria and a new de-

- posit framework // *Geoscience Australia Record*. 2009/20. 2009. 44 p.
- Smelova T.V., Krylova N.V., Shestoporov I.N.* Synthetic mineral-like matrices for HLLW solidification: preparation by induction melter with a cold crucible (CCIM) // *MRS Symp. Proc.* V. 465. 1997. P. 425–431.
- Sobolev I.A., Stefanovsky S.V., Omelianenko B.I., Ioudintsev S.V., Vance E.R., Jostsons A.* Comparative study of synroc-c ceramics produced by hot-pressing and inductive melting // *MRS Symp. Proc.* V. 465. 1997. P. 371–378.
- Status and trends in spent fuel and radioactive waste management. Vienna: IAEA, 2022. 88 p.
- Stefanovsky S.V., Yudin S.V., Vinokurov S.E., Myasoedov B.F.* Chemical-technological and mineralogical-geochemical aspects of the radioactive waste management // *Geochemistry International*. 2016. V. 54. № 13. P. 1136–1156.
- Stefanovsky S.V., Stefanovsky O.I., Myasoedov B.F., Vinokurov S.E., Danilov S.S., Nikonov B.S., Maslakov K.I., Teterind Yu.A.* The phase composition, structure, and hydrolytic durability of sodium-aluminum-(iron)-phosphate glassy materials doped with lanthanum, cerium, europium, and gadolinium oxides // *J. of Non-Cryst. Solids*. 2017. V. 471. P. 421–428.
- Stefanovskii S.V., Stefanovskaya O.I., Semenova D.V., Kadyko M.I., Danilov S.S.* Phase composition, structure, and hydrolytic stability of sodium-aluminum(iron) phosphate glass containing rare-earth oxides // *Glass and Ceramics*. 2018. V. 75. № 3–4. P. 89–94.
- Stefanovsky S., Ptashkin A., Knyazev O., Stefanovsky O., Yudin S., Nikonov B., Myasoedov B.F.* Cold crucible melting and characterization of titanate-zirconate pyrochlore as potential rare earth / actinide waste form // *Ceram. International*. 2019a. V. 45. P. 3518–3521.
- Stefanovsky S.V., Stefanovsky O.I., Danilov S.S., Kadyko M.I.* Phosphate-based glasses and glass ceramics for immobilization of lanthanides and actinides // *Ceram. International*. 2019b. V. 45. P. 9331–9338.
- Uranium 2022: Resources, Production and Demand. OECD NEA, Rep. №. 7634. 2023. 561 p.
- Vlasov V.I., Kedrovsky O.L., Nikiforov A.S., Polyakov A.S., Shishtchitz I.Y.* Handling of liquid radioactive waste in the concept of closed nuclear fuel // in the “Back End of the Nuclear Fuel Cycle: Strategies and Options”. Vienna, Austria: IAEA, 1987. P. 109–117.
- Wyborn L.A.I., Heinrich C.A., Jaques A.L.* Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria // *AusIMM Publication Series 4/94*. 1994. P. 109–115.
- Zoback M.D., Townend J., Rollimund B.G.* Steady-state failure equilibrium and deformation of intraplate lithosphere // *International Geology Review*. 2002. V. 44. P. 383–401.

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, К-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 (SiO<sub>2</sub>), 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 (Ферман, 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.

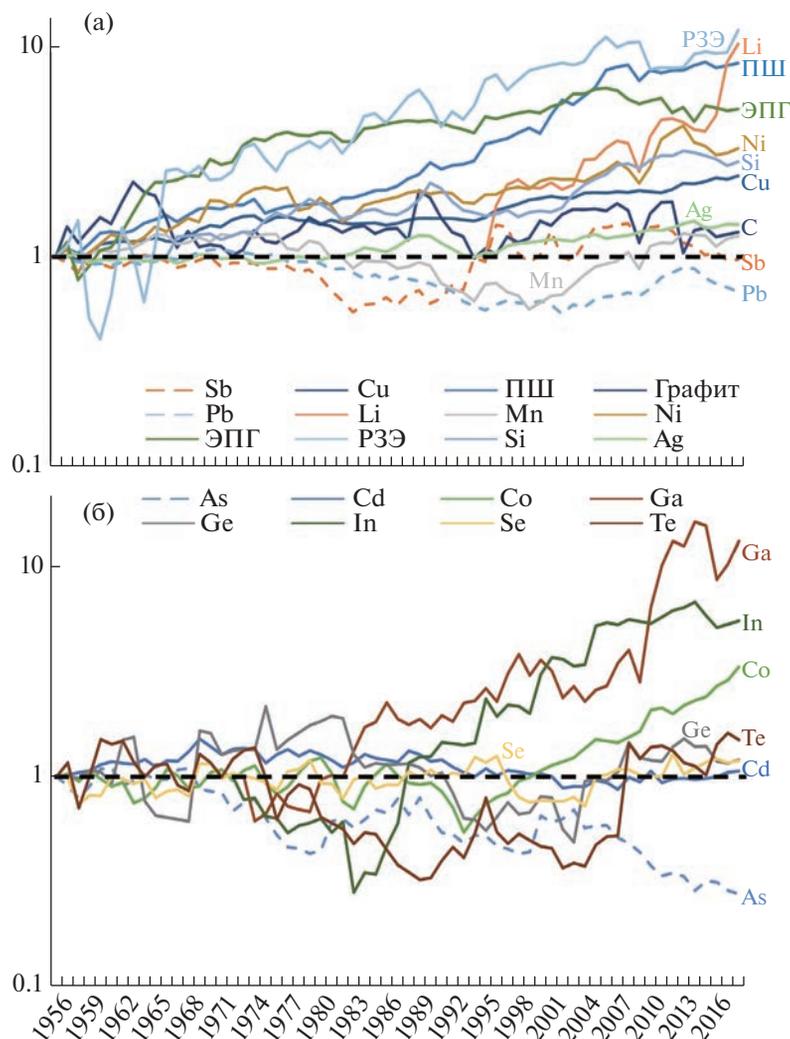
В связи со сложной структурой добычи, переработки и потребления сырья многие его виды являются дефицитными. Это понятие понимается по-разному. Понятие *дефицитное МС* в отече-

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



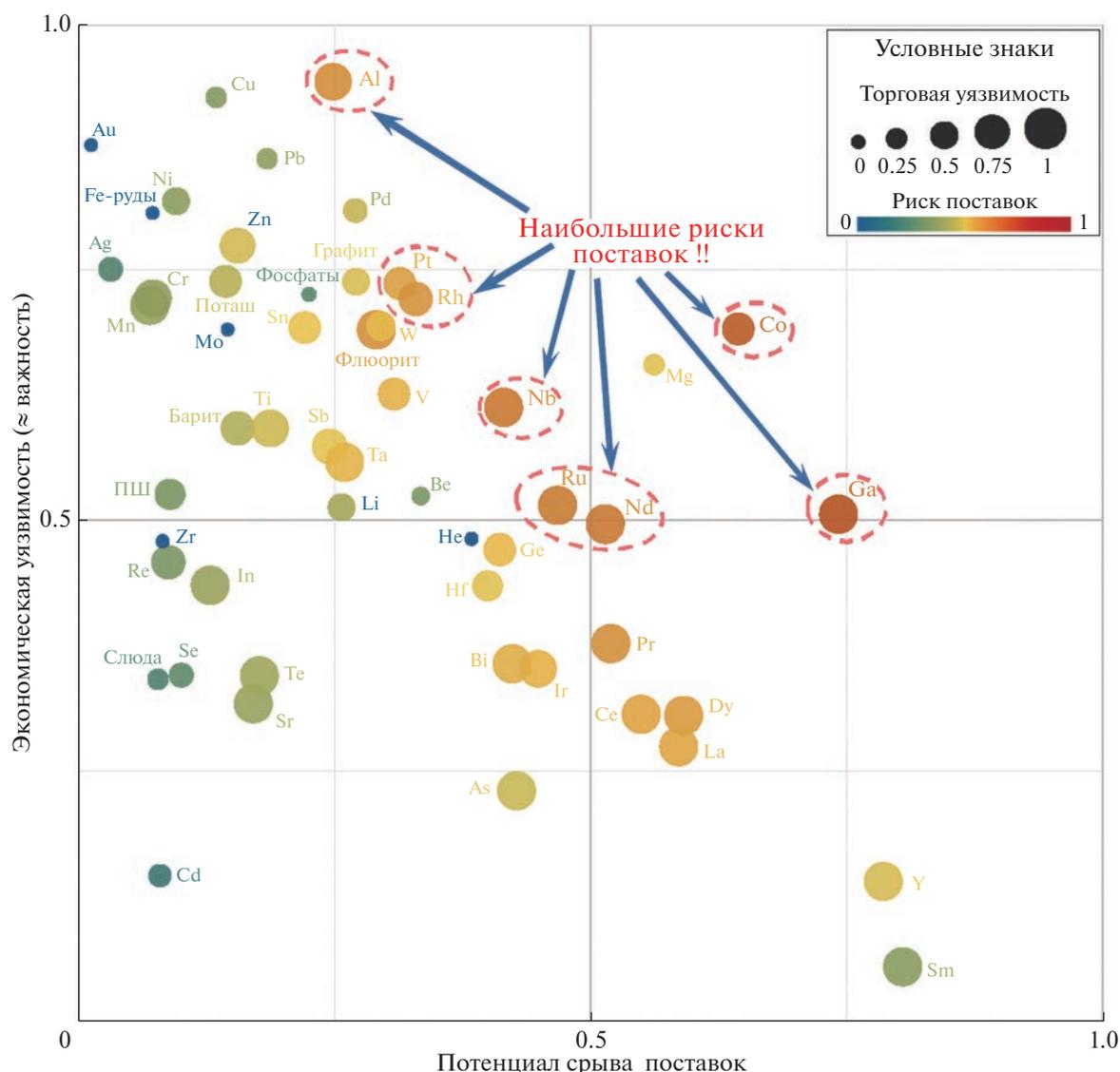
**Фиг. 1.** Мировая добыча аккумуляторных и энергетических металлов и неметаллов, нормализованная к 1956 г. (или самой ранней доступной дате – для галлия (1978), германия (1957) и индия (1972)) на душу населения, с разбивкой данных по металлам и минералам, производимым в качестве основного и сопутствующего 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 РЗЭ – 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-

углеродным 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 (SiO<sub>2</sub>), 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 (×) <sup>1</sup>
		со стороны новых технологий	
La	36 тыс.	2.1	570–19000 <sup>×</sup>
Pt	190	0.11	600–7500 <sup>×</sup>
Ir	6.8	0.01	200–3400 <sup>×</sup>
Y	7600	2.7	600–1700 <sup>×</sup>
V	91 тыс.	320	190–220 <sup>×</sup>
Li	95 тыс.	7500	11–75 <sup>×</sup>
Графит	1.2 млн	22 тыс.	9–45 <sup>×</sup>
Ru	33	12	7–53 <sup>×</sup>
HREE*	1300	850	8–10 <sup>×</sup>
Co	130 тыс.	50 тыс.	3–10 <sup>×</sup>
Sc	9.1	5	1.2–14 <sup>×</sup>
LREE**	31 тыс.	10 тыс.	6–7 <sup>×</sup>
Ge	140	59	4–5 <sup>×</sup>
Ta	1800	1200	2–3 <sup>×</sup>

Примечание. <sup>1</sup> 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 переносимости 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-

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																														
<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>La</td><td>Ce</td><td>Pr</td><td>Nd</td><td>Pm</td><td>Sm</td><td>Eu</td><td>Gd</td><td>Tb</td><td>Dy</td><td>Ho</td><td>Er</td><td>Tm</td><td>Yb</td><td>Lu</td> </tr> <tr> <td>Ac</td><td>Th</td><td>Pa</td><td>U</td><td>Np</td><td>Pu</td><td>Am</td><td>Cm</td><td>Bk</td><td>Cf</td><td>Es</td><td>Fm</td><td>Md</td><td>Nb</td><td>Lr</td> </tr> </table>																		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
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 → B алмазы, графит  
C  
Al бокситы  
Si 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
<b>Тантал</b>	40	60
<b>Ниобий:</b>		
для химической промышленности	100	—
для металлургии	2	98
<b>Литий</b>	—	100
<b>РЗЭ</b>	0.3	99.7
<b>Титан:</b>		
для химической промышленности	—	100
для металлургии	7	93
<b>Цирконий:</b>		
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																														
<table border="1"> <tr> <td>La</td> <td>Ce</td> <td>Pr</td> <td>Nd</td> <td>Pm</td> <td>Sm</td> <td>Eu</td> <td>Gd</td> <td>Tb</td> <td>Dy</td> <td>Ho</td> <td>Er</td> <td>Tm</td> <td>Yb</td> <td>Lu</td> </tr> <tr> <td>Ac</td> <td>Th</td> <td>Pa</td> <td>U</td> <td>Np</td> <td>Pu</td> <td>Am</td> <td>Cm</td> <td>Bk</td> <td>Cf</td> <td>Es</td> <td>Fm</td> <td>Md</td> <td>Nb</td> <td>Lr</td> </tr> </table>																		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
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 металлогенетический 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	
<b>Важнейшие PЗЭ:</b>	Ga	Не оценивался U	Sb	<b>Re</b>	
	Nb		Флюорит	<b>Be</b>	
	Co		Mg	<b>Nb</b>	
	Nd		Ru	Si	<b>Ta</b>
	Dy		Rh	Барит	<b>HREE</b>
	Pr		Al	Ga	<b>Y</b>
	Ce		Флюорит	Графит	<b>Sc</b>
	La		Pt	Ta	<b>LREE</b>
	Y		Ir	Бокситы	<b>Ge</b>
	Sm		Bi	Ge	<b>Ga</b>
<b>др. PЗЭ:</b> ≈Er* ≈Eu* ≈Gd* ≈Ho* ≈Lu* ≈Tb* ≈Tm* ≈Yb*	Sb	Отнесение к критическим минералам требует дополнительной оценки (м.б. пересмотрено)	Ti	<b>Li</b>	
	Ta		Be	<b>Hf</b>	
	Hf		Hf	<b>Co</b>	
	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** – редкометалльные пегматиты (Завитинское, Вишняковское) и танталоносные редкометалльные граниты (Орловское, Этыкинское, Вознесенское); **Ta-Nb** – редкометалльные щелочные граниты (Катугин,

Улуг-Танзек) и лопаритоносные агнаитовые нефелиновые сиениты (Ловозерское); **Nb** – карбонатитовые (Томтор) и коры выветривания по карбонатитам (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 – острее. 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).

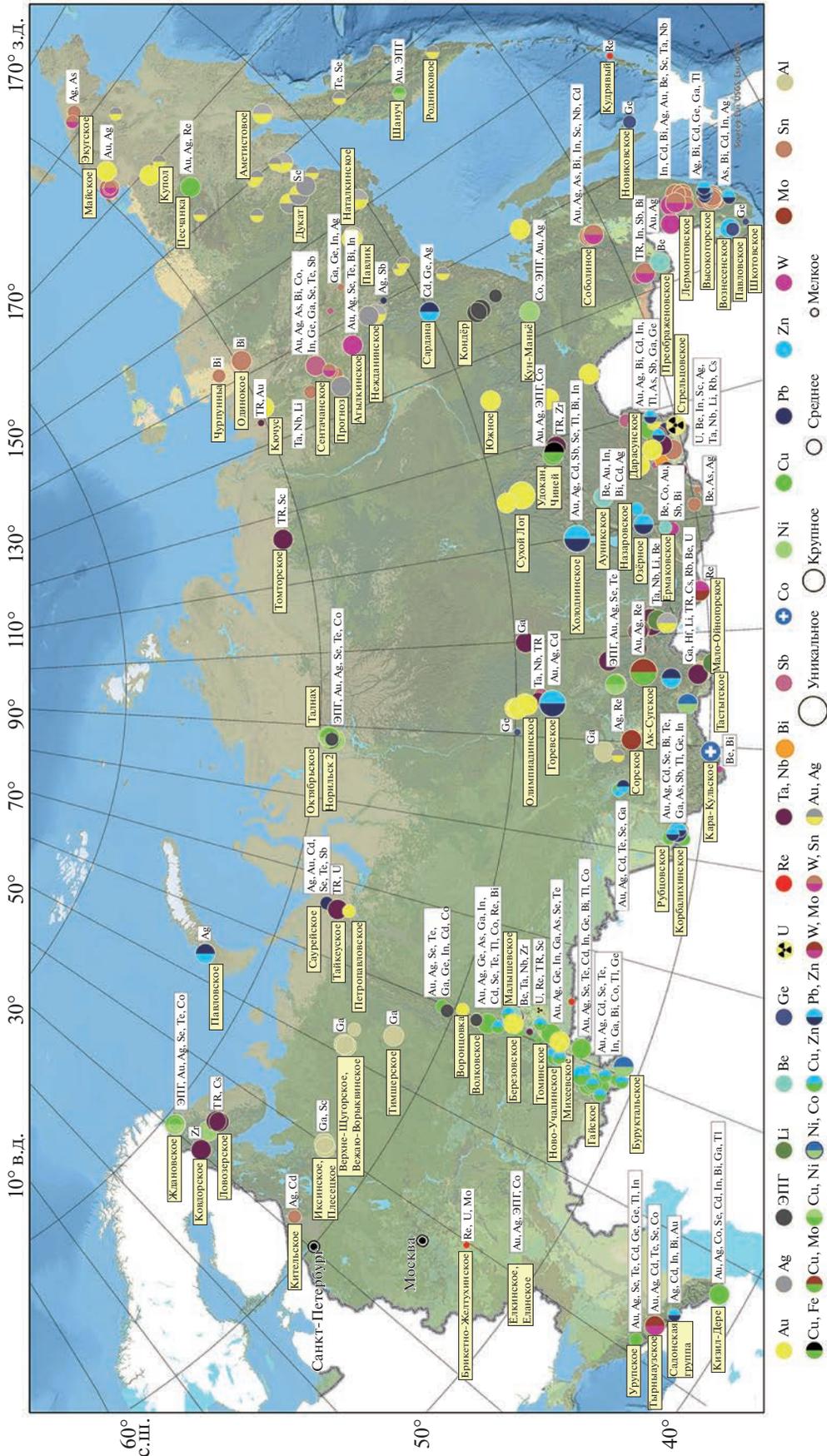
## ПРОБЛЕМА ПОПУТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

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 <sub>BeO</sub> , 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)



Фиг. 6. Рудные месторождения РФ, являющиеся источниками критического минерального сырья для цветной металлургии и редкометалльной промышленности. Их руды несут попутные благородные, редкие и рассеянные металлы и полуметаллы – они перечислены на белых флажках; для редкометалльных (Be, Li, Zr, Re) месторождений указаны и основные, и попутные элементы. Месторождения Au всегда несут попутное Ag (на карте указано, но не везде). Размер цветного значка соответствует величине запасов основного компонента руд.

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. Лаверову 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](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>

УДК 553.46

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ И ПРОБЛЕМЫ ОСВОЕНИЯ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ ДЕФИЦИТНЫХ СТРАТЕГИЧЕСКИХ ВИДОВ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ СИБИРИ

© 2023 г. Н. П. Похиленко<sup>a, \*</sup>, В. П. Афанасьев<sup>a, \*\*</sup>, А. В. Толстов<sup>a, b, \*\*\*</sup>,  
Н. Н. Крук<sup>a, \*\*\*\*</sup>, Л. Н. Похиленко<sup>a, \*\*\*\*\*</sup>, О. А. Иванова<sup>a, \*\*\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, пр. Коптюга, 3, Новосибирск, 630090 Россия

<sup>b</sup>Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, пр. Ленина, 39, Якутск, 677000 Россия

\*E-mail: chief@igm.nsc.ru

\*\*E-mail: avp-diamond@mail.ru

\*\*\*E-mail: tols61@mail.ru

\*\*\*\*E-mail: kruk@igm.nsc.ru

\*\*\*\*\*E-mail: lu@igm.nsc.ru

\*\*\*\*\*E-mail: ksu\_88@bk.ru

Поступила в редакцию 29.05.2023 г.

После доработки 05.06.2023 г.

Принята к публикации 15.06.2023 г.

Проведен анализ состояния минерально-сырьевой базы стратегических видов твердых полезных ископаемых в России в целом и в Сибири в частности. Особое внимание уделено перспективам развития сырьевой базы лития, редкоземельных металлов, обычных и импактных алмазов на территории Сибири. Проведена оценка характеристик ряда месторождений и вариантов их освоения с учетом качества руд, географического положения, состояния инфраструктуры и уровня разработок технологий обогащения руд и получения конечных продуктов. Оценены перспективы развития сырьевой базы ниобия и редкоземельных металлов в пределах Томторского массива и территории Уджинского поднятия в целом. Приводятся сводные результаты многолетних региональных полевых и лабораторных исследований распределения и вариаций особенностей состава Сг-пиропового граната, наиболее информативного из набора индикаторных минералов для определения потенциальной алмазности кимберлитов, отобранного из разновозрастных промежуточных коллекторов Сибирской платформы. На основе этих результатов проведено прогнозирование в пределах платформы участков с признаками присутствия новых полей потенциально алмазных кимберлитов среднепалеозойского возраста. Приводится минералогическое описание и оценка технологических характеристик импактных алмазов Попигойской астроблемы и зоны выброса в ее обрамлении. Обосновывается перспективность создания нового крупного района добывающей промышленности на сырьевой базе стратегических материалов территории Лено-Хатангского междуречья.

*Ключевые слова:* сырьевая база, Сибирь, стратегические материалы, литий, ниобий, редкоземельные металлы, алмазы, импактные алмазы

**DOI:** 10.31857/S0016777023050088, **EDN:** YONCHO

### ВВЕДЕНИЕ

Состояние минерально-сырьевой базы твердых полезных ископаемых (далее МСБ ТПИ) Российской Федерации в настоящее время требует неотложных мер по значительному повышению качества и объемов геологоразведочных работ регионального, прогнозно-поискового и поисково-оценочного характера на слабо изученных территориях Сибири и Дальнего Востока, с особым вниманием к арктическим регионам, где наиболее вероятно открытие новых крупных месторождений (Бортников и др., 2010; Добрецов, Похиленко,

2010; Похиленко и др., 2015, 2016). С 1991 г. произошло значительное сокращение государственных программ по геологическому изучению недр и воспроизводству МСБ, и к настоящему времени объем геологических работ по взаимосвязанной линейке “региональные исследования—прогнозно-поисковые работы—поисково-оценочные работы” сократился более чем на порядок в сравнении с таковыми в 1970–1980-е гг.

Результатом этой ситуации явилось катастрофическое (в десятки раз) снижение уровней технических и кадровых ресурсов госпредприятий,

деградация (в абсолютном большинстве регионов – полная ликвидация) профильных учреждений отраслевой науки, лишенных возможности проведения системных тематических исследований. Практически полная ликвидация геологоразведочных работ начальных стадий на новых территориях, вывод их из активного недропользования несет для государства серьезные проблемы экономического и геополитического характера. Это особенно актуально для слабо изученных территорий Арктической зоны Восточной Сибири, Забайкалья и Дальнего Востока (Крюков и др., 2016; Похиленко и др., 2016).

Крупные добывающие компании ведут геологоразведочные работы по проектам, в которых принятие инвестиционного решения связано с минимальными рисками. Это обеспечивается, в основном, работами по доизучению лицензионных участков вблизи действующих добывающих предприятий, не выходящими на новые территории, что создает серьезные проблемы в части общего состояния и качества МСБ по целому ряду стратегически важных видов полезных ископаемых (Добрецов, Похиленко, 2010; Бежанова, Стругова, 2015; Похиленко и др., 2016). Продолжается значительное сокращение, а в большинстве случаев и полное закрытие отраслевых НИИ и тематических подразделений отрасли в Сибири и на Дальнем Востоке. В условиях перманентного недостатка бюджетных ассигнований для проведения полномасштабных геологических исследований на уровне объемов советского периода именно эти подразделения должны были обособлять и сконцентрировать ограниченные материальные и кадровые ресурсы на стратегически важных направлениях и ключевых районах. Количественная оценка сложившейся общей структуры геологического изучения недр РФ, связанных с развитием МСБ ТПИ, в том числе и их стратегических видов, выглядит следующим образом:

1. Геологоразведочные комплексы и службы частных и добывающих компаний с государственным участием ведут работы по оценке и разведке запасов в основном на своих известных объектах с незначительными рисками неподтверждения ожидаемых геолого-экономических характеристик. Объем этих работ составляет около 75% от общего объема ГРР, связанных с развитием МСБ ТПИ.

2. Геологические исследования новых, либо слабо изученных участков, ведущиеся мелкими и средними юниорными компаниями на основе заявительного принципа, составляют всего до 8% от общего объема ГРР. Таким образом, ожидания значительного увеличения объемов ГРР за счет раздачи лицензий на участки по заявительному принципу не оправдались.

3. Объем региональных геологических исследований и поисково-оценочных работ, проводимых геологическими предприятиями государственной собственности по государственным программам, составляет 12–13% от общего объема ГРР.

4. Объем работ фундаментального характера по изучению сырьевого потенциала недр, проводимых профильными академическими институтами, колеблется в пределах 4–5% от общего объема ГРР.

Ожидаемым следствием такого характера структуры работ по геологическому изучению недр явилось:

1. Практически полное исчерпание банка объектов “поискового задела” по большей части стратегических видов ТПИ.

2. Весьма значительное сокращение государственного фонда рентабельных участков недр для представления в лицензионное пользование добывающим компаниям.

3. Нарастающее снижение вероятности открытия новых месторождений ТПИ традиционных типов в связи: а) с высокой степенью изученности доступных территорий с относительно простыми геолого-поисковыми условиями; б) с наличием инфраструктурных ограничений в труднодоступных районах страны; в) с необходимостью использования наукоемких технологий ведения ГРР на территориях со сложными геолого-поисковыми условиями.

4. Отсутствие надежных эффективных комплексов методик для поисков месторождений обычных видов ТПИ нетрадиционных типов, а также месторождений новых видов ТПИ, запрашиваемых современными направлениями высокотехнологичной промышленности, к примеру, технологиями “чистой” энергетики.

5. Отток квалифицированных кадров в 90-е годы из организаций бывшего Мингео СССР в частные компании и отсутствие сколько-нибудь серьезного внимания со стороны государства к государственным организациям геологической отрасли обуславливали нежелание молодежи связывать свой профессиональный путь с такими организациями, что приводило к упадку многих геологических коллективов и школ.

6. В течение 30-летнего периода деградации государственной геологической службы создались условия, когда на руководящие позиции в геолого-поисковых и добывающих организациях и компаниях приходили люди без серьезного опыта ведения успешных геологоразведочных работ, без опыта открытий месторождений, а зачастую даже без качественного профильного образования, что, естественно, отрицательно воздействовало на возможности развития МСБ страны.

В последние десятилетия воспроизводство погашаемых запасов обеспечивалось преимущественно за счет известных месторождений, в том числе на основе их переоценки и доразведки. Но к настоящему времени в государственном резерве таких объектов уже практически не осталось. Значительная часть участков, изучавшихся за счет государственных средств, сегодня остается невосстановленной по экономическим соображениям, а пока еще оставшийся поисковый задел в районах с развитой инфраструктурой ограничивает возможности открытий на новых сложных для освоения территориях. Отсутствие необходимых научно-методологических, технологических, организационных и финансовых условий, регулируемых государством и способствующих поступательному развитию МСБ в соответствии с возрастающими запросами промышленности, также не позволяют рассчитывать на закономерные и остро необходимые открытия новых высоколиквидных месторождений в ближайшем будущем (Похиленко и др., 2016а, 2016б). Многолетние организационно-финансовые ограничения привели к непозволительному с технологической точки зрения сокращению поисковых и оценочных работ — только за 5 последних лет почти втрое уменьшено количество объектов, изучаемых за государственный счет, а их финансирование — более чем вдвое. В дополнение к этому имеется опасная проблема, связанная со значительными различиями между существующими оценками обеспеченности РФ формальными (на бумаге) и реальными (рентабельными) запасами.

Большое негативное влияние на результативность ГРП по развитию МСБ ТПИ оказывает нарушение их стадийности и сбалансированности целей и задач различных этапов общего процесса ведения таких работ. В результате на территориях со сложными геолого-поисковыми обстановками, несмотря на их высокие перспективы, резко снизилась активность исследований в области объективных геологических оценок потенциала территорий, научного прогнозирования, разработки новых методов ведения прогнозно-поисковых работ, базирующихся на современных научных знаниях.

На РФ приходится всего 5% общемировых инвестиций в геологоразведку. Австралия и Канада инвестируют соответственно в 2 и 3 раза больше. Количество инвестиций в геологоразведку в расчете на 1 км<sup>2</sup> территории показывает очень низкий по сравнению с Канадой, да и рядом других стран, уровень отечественных вложений в этот сектор. Средний уровень вложений в геологоразведку в десятке ведущих по уровню инвестирования в эту сферу стран — около \$100/км<sup>2</sup>, а по России — всего \$28/км<sup>2</sup>, т.е. почти в четыре раза ниже. В то же время руководством нашей страны

проводится постоянная и последовательная работа по определению и уточнению главных стратегических направлений ее экономического развития. Предлагаемые модели существенно различаются между собой, но все они обречены относить к разряду бесспорных то обстоятельство, что в нашей стране, с ее огромными природными богатствами, минерально-сырьевой комплекс еще долго будет сохранять свой особый статус. В любой из них он будет оставаться значимым не только в формировании национального ВВП, но и являться надежным источником поступлений в консолидированный бюджет страны и ее государственные резервные фонды, в т.ч. за счет экспорта.

Таким образом, в нынешних условиях, а также на среднесрочную (15–20 лет) перспективу и с учетом недавних заявлений Президента РФ о программе достижения Россией углеродного баланса к 2060 году, долгосрочную (30–40 лет) перспективу в Арктической зоне РФ экономически эффективным будет освоение крупных и сверхкрупных месторождений высоколиквидных стратегических видов ТПИ, открытие которых маловероятно на ранее освоенных и достаточно хорошо изученных территориях страны (Толстов и др., 2014; Толстов, Самсонов, 2014; Крюков и др., 2016). Технический прогресс не только не снижает потребность в подобных полезных ископаемых, но и расширяет их номенклатуру, что требует расширения и модернизации МСБ как на сегодняшний день, так и на перспективу. Прогноз развития МСБ стратегических видов ТПИ вплоть до 2060 года является приоритетной задачей, и ее решение невозможно без активного вовлечения в эту деятельность коллективов профильных академических институтов Минобрнауки РФ, накопивших большой массив важной информации для прогнозирования, поисков и освоения имеющихся ресурсов минерального сырья. Особое и определяющее значение это имеет для научного, экспертного и аналитического сопровождения тематических, прогнозно-минерагенических и поисковых работ на слабо изученных территориях, в первую очередь арктических и субарктических территориях Центральной и Восточной Сибири.

#### СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МСБ СТРАТЕГИЧЕСКИХ ВИДОВ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ В СИБИРИ

Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, а также решение проблем повышения энерговооруженности экономики и наращивания объема выработки и сохранения энергии, ее передачи и использования ставит на первый план развитие отечественной добывающей промышленности высоколиквидных и дефицитных видов сырья. К ним относятся благородные, редкие (РМ) и редкоземельные (РЗМ) ме-

таллы и алмазы, включая импактные алмазы с уникальными технологическими характеристиками. Обеспечение экономики страны РМ и РЗМ носит критический характер для национальной безопасности и является важным условием модернизации промышленности. Без РМ и РЗМ невозможно полноценное внедрение 14 из 27 критических технологий, утвержденных Указом Президента РФ от 07 июня 2011 г. № 899, включая базовые и критические военные и промышленные технологии для создания перспективных видов вооружения, военной и специальной техники; технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения; технологии создания электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств. Особое значение РМ и РЗМ приобретают в развитии технологий “чистой” энергетики. Так, по данным Международного энергетического агентства, потребление этим направлением промышленности РЗМ к 2040 г. вырастет в 7 раз, а лития – в 42 раза, и дефицит на мировом рынке РМ и РЗМ начнет ощущаться и затем стремительно расти вместе с ценами уже в 2024 году.

Для обеспечения экономической безопасности РФ, помимо развития на долгосрочную перспективу и вовлечения в обеспечение развивающихся отечественных высокотехнологических отраслей экономики существующих объектов, необходимо вести разведку и включать в развивающиеся производственные цепочки новые крупные месторождения высоколиквидных и дефицитных ТПИ на еще недостаточно освоенных территориях Сибири и ее Арктической зоны. Эти территории являются исключительно перспективными на выявление таких месторождений и их полноценное включение в минерально-сырьевую базу отечественных высокотехнологичных отраслей станет важным фактором их опережающего развития (Бортников и др., 2010; Добрецов, Похиленко, 2010; Гусев и др., 2012; Похиленко и др., 2012, 2014; Толстов и др., 2014, 2017; Крюков и др., 2016). Особая геополитическая и экономическая важность освоения и развития Арктической зоны Сибири неоднократно подчеркивалась в последнее десятилетие в ряде решений руководства страны. В то же время отсутствие на арктических территориях развитой инфраструктуры и суровые климатические условия делают нерентабельным освоение мелких и средних по запасам месторождений даже дефицитных и стратегически важных видов полезных ископаемых. В этой связи в нынешних условиях, а также на среднесрочную перспективу (15–20 лет) в Арктической зоне Сибири и РФ в целом экономически эффективным будет освоение крупных и сверхкрупных месторождений ряда дефицитных видов сырья, практически отсутствующих на освоенных территориях страны (Толстов, Гунин, 2001; Похилен-

ко, Толстов, 2012; Похиленко и др., 2012, 2016; Yelisseev et al., 2015, 2018; Крюков и др., 2016; Толстов и др., 2017).

В приграничных арктических территориях Красноярского края и Республики Саха (Якутия) имеются уникальные по запасам и качеству руд Томторское месторождение РМ и РЗМ (Кравченко и др., 1990; Лапин, Толстов, 1991; Коноплев и др., 1995; Похиленко и др., 2014; Толстов и др., 2014, 2017; Крюков и др., 2016) и Попигайское месторождение импактных алмазов, обладающих уникальными технологическими характеристиками (Масайтис и др., 1972, 1998; Вишневецкий и др., 1997; Похиленко и др., 2012). Их освоение и доизучение на многие десятилетия обеспечат внутренние и экспортные потребности страны в этих видах материалов. Вблизи лишь частично изученного Томторского массива имеются четыре практически не изученных массива близкого происхождения с высокими перспективами выявления крупных запасов РМ, РЗМ и благородных металлов (Толстов, 2006; Игнатов и др., 2022; Никифорова, Толстов, 2022). Кроме того, данный район имеет весьма высокие перспективы выявления богатых коренных месторождений ювелирных алмазов (Pokhilenko et al., 1999; Добрецов, Похиленко, 2010; Афанасьев и др., 2011). Таким образом, в этой части Арктики уже сейчас имеется надежная сырьевая база для создания крупного района горнодобывающей промышленности, сопоставимого по геополитической и экономической значимости с Норильским (Крюков и др., 2016; Похиленко и др., 2016а, 2016б). Его функционирование будет тесно связано с развитием цепочки перерабатывающих предприятий, обеспечивающих внутренние и экспортные потребности страны широкой линейкой РМ и РЗМ, и созданием независимого отечественного источника этих металлов для многочисленных стратегически важных направлений отечественной промышленности, что является важнейшим элементом обеспечения национальной безопасности (Похиленко, Толстов, 2012; Крюков и др., 2016; Похиленко и др., 2016б).

### СОСТОЯНИЕ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ И ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИТИЯ В СИБИРИ

До середины 90-х годов прошлого века литий в мире, включая Россию, добывался из сподуменпегматитового сырья (сподумен – Li-содержащий силикат –  $\text{LiAl}[\text{Si}_2\text{O}_6]$ , содержание  $\text{Li}_2\text{O}$  в сподумене составляет 6.5–7.7 мас. %) (Емельянов, Макагон, 1998; Владимиров и др., 2011, 2012;). Однако начиная с середины 90-х годов на мировом рынке появился новый поставщик дешевого карбоната лития, производимого из рапы соленых озер района Салара–де-Атакама (Чили),

который вытеснил производителей литиевой продукции, включая Россию, производившую в период до 90-х годов до 20% мирового объема лития и его соединений. Это привело к утрате позиций России на мировом рынке лития и стагнации всего отечественного литиевого промышленного комплекса. В то же время в Сибири существуют месторождения сподуменовых пегматитов Центрально-Азиатского складчатого пояса (Овчинников, Кузьменко, 1976; Загорский, Кузнецова, 1990; Емельянов и др., 1998; Владимиров и др., 2011, 2012; Загорский и др., 2014) и литиеносные подземные рассолы Сибирской платформы, общие запасы Li и его прогнозные ресурсы категорий P<sub>1</sub> и P<sub>2</sub> которых огромны (~ 4500 тыс. т) и сопоставимы с таковыми для Чили, Аргентины, Боливии и Китая. Они могут быть востребованы в связи с переходом на технологии “чистой энергетики”, электромобили и связанным с этим острым дефицитом литиевых аккумуляторов, а также стремительно растущими потребностями в литии в широком ряде других высокотехнологических отраслей.

На сегодняшний день в Иркутской области известны Ковыктинское и Знаменское месторождения гидроминерального сырья. Содержание лития и дополнительных компонентов в рассолах этих месторождений значительно превышает их концентрации в традиционном промышленно перерабатываемом сырье. Это единственное место в мире, кроме соленых озер в Чили, где концентрация лития доходит до 0,7 г/дм<sup>3</sup>. Задokumentированы скважины с дебетом до 5–7 тыс. м<sup>3</sup>/сут, выносящие за сутки до 10 т хлористого лития. Значительные концентрации лития имеются в межпластовых рассолах кембрийских пород районов алмазодобычи Якутии (табл. 1).

Запасы рассолов в Ангаро-Ленском бассейне могут обеспечить годовой объем производства более 17 000 тонн карбоната лития, что превышает мощность действующих производств по извлечению лития из рассолов озер в Китае (более 10000 т карбоната лития в год), США (6000 т в год) и Аргентине (12 000 т в год). По предварительной оценке запасов промышленных рассолов Ангаро-Ленского бассейна, а также на основании технико-экономической оценки использования этих рассолов для производства лития и дополнительных компонентов (брома, бора, стронция, калия, магния), Иркутскую область можно рассматривать как крупную минерально-сырьевую базу.

В настоящее время такие компании, как “Газпром” и “ИНК”, занимаются развитием проектов по добыче лития из промышленных рассолов месторождений Иркутской области.

Ключевым моментом развития минерально-сырьевой базы лития являются новые и незаслуженно забытые химико-технологические исследования, связанные с механохимическим переде-

**Таблица 1.** Микрокомпонентный состав дренажных рассолов карьера трубки “Удачная”

№ п/п	Название элемента, соединения	Содержание, мг/л
1	Аммония сульфат NH <sub>4</sub>	300
2	Цезий Cs	0.1–0.7
3	Медь Cu	0.468
4	Барий Ba	1.5–2.1
5	Кадмий Cd	0.044
6	Свинец Pb	2–3
7	Бром Br	3000
8	Литий хлористый LiCl	340

лом минерального сырья, позволяющим резко удешевить получение конечных промпродуктов из богатых сподумен-пегматитовых руд и хвостов горно-обогатительных комбинатов. В этой связи проводившиеся и проводимые в профильных институтах Сибирского отделения РАН исследования, задачей которых является разработка новых методов поиска и изучения рудных и техногенных месторождений лития, а также создание экологически безопасных технологий обогащения и переработки минерального сырья, закладывают научные основы вывода из стагнации производства лития в России (Владимиров и др., 2011, 2012, 2014).

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (г. Новосибирск), Институт геохимии им. А.П. Виноградова (г. Иркутск), Институт земной коры (г. Иркутск) провели комплексные экспедиционные работы и минералогические исследования. Сейчас они располагают геоинформационной базой данных и уникальной коллекцией опытно-лабораторных проб качественных сподуменовых руд (0.5–2.5 т) по всем перспективным сподумен-пегматитовым месторождениям Сибири. Эти материалы позволили перейти к решению вопросов технологической минералогии и разработке новых схем извлечения лития и его соединений из сподуменной руды (Алахинское месторождение в Горном Алтае, Гольцовое, Белореченское и Урикское месторождения сподуменовых пегматитов в Восточных Саянах), а также хвостов Забайкальского (Читинская область) и Асубулакского ГОКов (Восточный Казахстан).

Проведенные ранее комплексные исследования позволили выявить четыре геологических объекта, которые могут быть освоены с выдачей конечных литиевых продуктов в краткосрочной перспективе. К ним относятся: 1) Ташелгинское месторождение сподуменовых пегматитов, Кемеровская область; 2) Гольцовое месторождение сподуменовых пегматитов, Иркутская область;

3) Алахинское месторождение сподумен-порфиров, Горный Алтай; 4) литиеносное хвостохранилище Забайкальского горно-обогатительного комбината, Читинская область.

Для всех геологических объектов имеется необходимая геохимическая и минералогическая информация по составу руд, опытно-лабораторные пробы сподумен-пегматитовых руд и хвостов, разработаны принципиально новые технологии извлечения лития и (или) его соединений, однако сдерживающим фактором являются незащищенные в ГКЗ РФ запасы (за исключением Гольцового месторождения, практически подготовленного к эксплуатации). Во всех случаях необходима адаптация новых технологических схем по содержанию и качеству сподуменных руд к реальным месторождениям.

**Ташелгинское месторождение сподуменных пегматитов, Кемеровская область.** Открытие Ташелгинского рудного поля литиеносных пегматитов (ФГУП “Запсибгеолсъемка”, 2005–2007 гг.), непосредственно примыкающего к Ташелгинскому железорудному месторождению, а также совместные исследования, проведенные по минералогии, технологии переработки и экономической привлекательности Li руд этого типа (ИХТТМ СО РАН, ИГМ СО РАН, ФГУП “Запсибгеолсъемка”, ОАО “Новосибирский ВНИПИЭТ”, ИЭиОПП СО РАН) позволяет уже сейчас констатировать его перспективность при условии: а) переработки сподуменного концентрата в моноалюминат лития для электрохимической энергетики; б) цементного производства на основе алюмосиликатных хвостов с доломитовой присадкой. Следует обратить особое внимание, что в Ташелгинском рудном узле географически сближены и даже совмещены в геологических структурах все необходимы сырьевые источники для производства промпродуктов лития и цемента из хвостов будущего ГОКа, и здесь же размещены избыточные производства электроэнергии. Необходимо провести доразведку Ташелгинского месторождения сподуменных пегматитов на базе ФГУП “Запсибгеосъемка” с обязательным минералого-технологическим сопровождением, которое может быть реализовано ИГМ СО РАН–ИХТТМ СО РАН. Необходимый научный задел имеется (ИГМ СО РАН–ИХТТМ СО РАН), ранее были проведены поисково-разведочные работы (ФГУП “Запсибгеосъемка”). Доизучение Ташелгинского рудного поля сподуменных пегматитов позволит разработать полную технологическую схему переработки литиевого сырья для крупных месторождений Сибири: Гольцовое, Урикское, Белореченское в Восточном Саяне и соизмеримые с ними по масштабам месторождения Восточной Тувы (Емельянов и др., 1998; Кузнецова, Прокофьев, 2009; Владимиров и др., 2011, 2012; Кузнецова, Шокальский, 2011; Макагон,

2011). Необходима поддержка со стороны Минприроды РФ (Роснедра РФ), АО “Росгеология” и Минобрнауки РФ, а в качестве заказчика выступает Росатом.

**Гольцовое месторождение сподуменных пегматитов, Иркутская область.** Гольцовое, Урикское и Белореченское литиевые месторождения в Урикско-Ийском грабене расположены на расстоянии 20–30 км друг от друга, образуя единый рудный узел (Емельянов и др., 1998; Владимиров и др., 2012; Загорский и др., 2014). Они представлены жилами или сериями жил сподуменных пегматитов. Наибольший интерес представляет Гольцовое месторождение в северо-восточном борту Урикско-Ийского грабена. Протяженность поля около 20 км, площадь – 30 кв. км. Главные структурные элементы, контролирующие размещение сподуменных пегматитов – крупные тектонические нарушения взбросо-сдвигового типа с северо-западным простираем и падением на юго-запад под углами  $35^{\circ}$ – $60^{\circ}$ . Пегматиты выполняют кососекущие и межпластовые трещины. Один из самых крупных разломов, вдоль которого узкой полосой вытянуты жильные тела и серии жил, разделяет пегматитовое поле на Западный и Восточный структурно-тектонические блоки.

В Западном блоке разведаны одиночные пегматитовые жилы плитообразной, линзо- и четковидной формы, протяженность которых достигает 1.5 км, с мощностью в раздувах до 30 м. Для Восточного блока характерны серии многочисленных жильных тел сложной формы, многократно соединяющиеся и ветвящиеся, с раздувами и многочисленными апофизами. Общая мощность жильных пегматитовых серий достигает 100–140 м, протяженность – 2–2.5 км. Разведанные участки с промышленным оруденением имеют площадь около 5 кв. км. Содержание  $Li_2O$  в сподумене составляет 6.5–7.7 мас. %). Гольцовое месторождение является комплексным, так как содержит промышленные запасы тантала, цезия и других элементов-примесей.

**Урикское месторождение** расположено в юго-восточной части Урикско-Ийского грабена в непосредственной близости от Главного Саянского разлома. Протяженность – 2 км, при ширине около 500 м. Сподуменсодержащие пегматитовые жилы имеют крутое падение на юго-запад. Содержание  $Li_2O$  в сподумене составляет 7.1–7.2%.

**Белореченское месторождение** находится в юго-западном борту Урикско-Ийского грабена, оно подразделяется на два участка: Белореченский с литиевыми пегматитами и Бельский, содержащий жилы литиевых и тантал-олово-литиевых пегматитов. Белореченское месторождение приурочено к субмеридиональной зоне трещиноватости и смятия метаморфических пород. Протяженность пегматитовых жил составляет десят-

ки и сотни метров, при этом крупные жилы обособлены, а мелкие — образуют жильные серии. Наиболее крупная жила литиевых пегматитов Белореченского участка имеет северо-восточное простирание и крутые углы падения, форма ее неправильная, плитообразная с резкими колебнообразными изгибами. Строение жилы зональное, причем наиболее мощная зона — мелкоблочковая кварц-сподумен-микроклин-альбитовая — составляет около 75% всего объема жилы, достигающей мощности 40–50 м. В одной из жил этого участка наблюдается зона петалитового блокового пегматита с микроклином, в боковой части которой находятся сподумен и эвкрипит. Содержание  $\text{Li}_2\text{O}$  в сподумене Белореченского месторождения составляет 6.7–7.0%.

Имеющиеся данные по геологии литиевых месторождений сподуменных пегматитов и их технико-экономические показатели определенно показывают, что Восточно-Саянский пояс является перспективным для промышленного освоения, а Гольцовое месторождение является лучшим среди объектов данного геолого-промышленного типа. В Восточном Саяне это месторождение находится в относительно выгодных географических условиях и практически подготовлено для промышленного освоения (Макагон, 2011; Владимиров и др., 2012).

**Алахинское месторождение сподумен-гранит-порфириров, Горный Алтай**, является специфическим геологическим объектом, резко отличающимся от классических месторождений сподуменных пегматитов Сибири, Казахстана и Китая. Судя по прогнозным оценкам, это месторождение можно считать не вскрытым эрозией аналогом крупного пегматитового тела, например, жилы № 3 сподуменных пегматитов месторождения Коктогай (Северо-Восточный Китай), как по размерам, так и по содержаниям ценных компонентов ( $\text{Li}_2\text{O}$  и  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ), однако рудогенерирующий потенциал этого месторождения пока недостаточно изучен и не востребован. Месторождение было открыто в начале 90-х гг. прошлого века геологами Алтайской геолого-поисковой экспедиции В.И. Тимкиным и В.И. Масловым. Оно находится в Горном Алтае, с чем связана его очевидная недоизученность. Детальные минералогические исследования сподуменных гранит-порфириров Алахинского штока, представляющих собой, по сути дела, бедную литий-танталовую руду (вариации содержания  $\text{Li}_2\text{O}$  — 0.24–1.46, среднее — 0.98 мас. %, или 9.8 кг/т,  $\text{Ta}$  — 70–180 г/т, среднее — 114 г/т), имеют принципиальное значение для разработки схемы возможного обогащения этих руд в будущем.

**Литиеносное хвостохранилище Забайкальского ГОКа (Читинская область)**. За пятьдесят лет работы ЗабГОКа в карьерах хвостохранилища накопилось не менее 20 млн т отходов в виде мел-

кодисперсного материала, со средним содержанием оксида лития около 0.26% (2.6 кг/т  $\text{Li}_2\text{O}$ ). Суммарное содержание лития в хвостохранилище составляет 24 тысячи тонн, что соответствует 76.3 тыс. т карбоната лития. При стоимости карбоната лития 32.6 \$/кг (на декабрь 2021 г.), это составляет примерно 188 млрд руб. Суммарная стоимость попутных продуктов (кварцевого продукта, полевошпатового продукта, мусковита) находится на уровне 40–60 млрд руб. Таким образом, нынешняя общая товарная стоимость промпродуктов составляет около 250 млрд руб., что с учетом последовательного и быстрого роста цен на литий позволяет рассматривать хвостохранилище Забайкальского ГОКа как промышленное техногенное месторождение государственного значения.

Благодаря научно-исследовательским работам Сибирского отделения РАН (ИГМ–ИХТТМ–ИГХ) получены следующие результаты: 1) очерчены перспективные площади хвостохранилища для первоочередной разработки; 2) оценена возможность выборочной разработки сподуменных жил, находящихся вблизи отработанных карьеров; 3) отобраны представительные пробы из хвостохранилища, и на лабораторном уровне показана возможность выделения сподуменного концентрата с содержанием лития 2.8–3.7% (5.6–7.4% по оксиду лития), мусковита, кварцевого и полевошпатового продукта; 4) показана принципиальная возможность переработки сподуменного концентрата по методу И.С. Лилеева с получением в качестве конечного продукта двойного гидроксида алюминия и лития. Отработаны условия синтеза высокодисперсного гамма-моноалюмината лития, который получен как с использованием продуктов переработки сподумена, так и при применении товарного карбоната лития. Показана возможность применения высокодисперсного гамма-моноалюмината лития в тепловых литиевых батареях специального назначения, выпускаемого ОАО «Уралэлемент», а также в составе матричного электролита карбонатных топливных элементов нового поколения электростанций.

Для ввода в эксплуатацию Забайкальского техногенного месторождения требуется решить следующие взаимосвязанные геологические и технологические задачи:

— провести доразведку хвостохранилища ЗабГОКа с оценкой и защитой в ГКЗ запасов ценных компонентов, в первую очередь, сподумена, мусковита, кварцевого и полевошпатового концентратов, что возможно на базе ИГМ СО РАН и дочерних малых предприятий;

— создать полную технологическую схему разделения отходов ГОКа с получением сподуменного концентрата, мусковита, кварцевого и полевошпатового концентратов с учетом специфики дисперсного, химического и фазового состава ле-

жалых песков в различных частях (карьерах) хвостохранилища;

– исследовать возможности интенсификации процесса кислотного вскрытия сподуменового концентрата за счет предварительной обработки сподуменового концентрата с помощью механо-химической, радиационно-термической активации и микроволнового воздействия;

– отработать режимы электрохимического концентрирования и выделения карбоната лития из концентрированного водного раствора сульфата лития;

– создать лабораторную технологическую схему полной переработки отходов ЗабГОКа, на этой основе – технико-экономический бизнес-план малого гидрометаллургического производства, что возможно совместными усилиями ИХТТМ СО РАН–ИГМ СО РАН в содружестве с Забайкальским горно-обогатительным комбинатом, в качестве инвестора предполагается Росатом (корпорация “ТВЭЛ”).

#### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ЛИТИЯ И ЕГО СОЕДИНЕНИЙ ИЗ Li-СОДЕРЖАЩИХ РАССОЛОВ, РУД ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

К настоящему времени разработаны и апробированы на конкретных литиевых месторождениях новые технологии переработки сподуменных руд, хвостов горно-обогатительных комбинатов и литиеносных рассолов, которые позволяют по-новому взглянуть на месторождения Сибири в краткосрочной перспективе (Владимиров и др., 2011, 2012). Существенный вклад в решение геологических и технологических проблем был получен в рамках междисциплинарных интеграционных проектов Сибирского отделения РАН, в которых удалось объединить усилия ведущих специалистов НИИ СО РАН, отраслевых институтов и литиевого промышленного комплекса России (2006–2018 гг.).

Разработкой технологий получения лития Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН (ИХТТМ СО РАН) занимается с момента его создания в 1944 г. Так, д.т.н. И.С. Лилеевым с соавторами в 1950 г. была получена Сталинская премия за внедрение технологии выделения лития из сподумена на Красноярском химико-металлургическом заводе. В 70–80-х гг. в Институте разрабатывали технологию осаждения лития из попутных вод в виде двойных гидроксидов алюминия и лития (ДГАЛ). В 80–90-х гг. был предложен эффективный метод интеркаляции ионов лития в структуру гидроксида алюминия для селективной сорбции ионов лития из рассолов с образованием ДГАЛ. На данном принципе в Инсти-

туте был разработан высокоэффективный селективный сорбент и проведены испытания для извлечения лития из попутных нефтяных рассолов Сибири. С этой целью в Институте было создано опытное производство для его апробирования в укрупненных условиях на природных рассолах (табл. 1), самоизливающихся в карьер трубки “Удачная”. В результате работ был разработан технологический регламент по использованию рассолов трубки “Удачная”. Укрупненные испытания прошли успешно.

В середине 90-х годов часть сотрудников Института – разработчиков данной технологии – перешла в частную компанию ЗАО “Экостар-Наутех”. В 1994 году при финансовой поддержке АК “АЛРОСА” ими были осуществлены укрупненные испытания разработанной технологии на АО “Новосибирский завод редких металлов”. В процессе испытаний были отработаны все операции в соответствии с технологическим регламентом. В результате промышленных испытаний был получен концентрат, содержащий практически чистый раствор хлорида лития с концентрацией LiCl 7–10 г/л, который можно было далее концентрировать любыми методами: и при помощи обратного осмоса, и электродиализом, и термическим путем. С использованием разработанной технологии всего за одни сутки был получен раствор, содержащий 200 г/л хлорида лития, в то время как растворы с содержанием всего 60 г/л гелиоконцентрированием получали в течение двух-трех сезонов. Кроме того, после получения первичного концентрата можно производить любые соединения лития: моногидрат гидроксида лития, фторид лития, бромид лития, карбонат лития.

В 2004 году китайской компанией были проведены успешные испытания высокоселективного сорбента на китайских рассолах. Компания выпускает бишофит, осаждая часть магния, а оставшийся рассол используя для извлечения LiCl с получением первичного литиевого концентрата. Промышленный синтез сорбента осуществлен китайской компанией Foshan Electrical and Lighting Co., Ltd. С его применением компанией Lan-Ke-Lithium Co., Ltd (КНР) промышленно освоен процесс получения карбоната лития из рассолов оз. Дабсан-Нур (провинция Цинхай, КНР). Предприятие функционирует с 2012 г. и выпускает около 10 тысяч тонн карбоната лития в год.

В настоящий момент в ИХТТМ СО РАН сформировано подразделение “Инжиниринговый центр порошковых технологий” (ИЦПТ), в задачу которого входит отработка технологий и передача их в производство. При условии реконструкции помещений опытного производства ИЦПТ и его дооснащения оборудованием, Институт готов возобновить работы по воссозданию технологии извлечения лития из природных рассолов, при-

влекая при необходимости промышленных партнеров и научные организации.

Опыт работы с высокоминерализованными природными рассолами показывает, что одновременно с литием экономически выгодно извлекать другие ценные компоненты.

В ИХТТМ СО РАН на примере руд Ташелгинского и Гольцового месторождений разработаны новые нетрадиционные технологические схемы, базирующиеся на выделении двойного гидроксида алюминия и лития, а также с полным циклом извлечения карбоната лития с получением цемента из хвостов основного производства проектируемых ГОКов (в содружестве с Новосибирским заводом Химконцентратов, Новосибирским «ВНИПИЭТ» и ИЭиОПП СО РАН). В области материаловедения – разработана механохимическая технология получения моноалюмината лития, получены новые данные по поверхностному модифицированию катодных материалов с помощью оксидов, исследованы композиционные твердые электролиты на основе перхлората лития  $\text{LiClO}_4\text{-A}$  ( $\text{A} = \text{Al}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2, \text{LiAlO}_2$ ), разработаны новые литийсодержащие полимерные электролиты, а также созданы твердотельные среднетемпературные литиевые ячейки.

Основной задачей по ускоренному развитию производства лития в России является доработка имеющихся и разработка новых минералогических, геохимических и химико-технологических подходов к переработке руд литиевых месторождений, а также техногенных отходов горно-обогатительных комбинатов и химико-металлургических заводов для получения из них лития и других редких элементов высокой чистоты, а также их соединений.

*Главные задачи дальнейших исследований по развитию производства лития из природных и техногенных месторождений Сибири*

1. Усовершенствование химико-технологических схем переработки, обогащения и выделения мономинеральных фракций сподумена, адаптивное к реальным геологическим объектам: рудам конкретных сподумен-пегматитовых месторождений и Li-содержащему сырью хвостохранилищ горно-обогатительных комбинатов.

2. Аттестация сподуменовых концентратов как исходного промпродукта для производства моноалюмината лития и других химических соединений в целях создания литиевых аккумуляторов и других изделий с этим энергоэлементом.

3. Доразведка литиевых месторождений с экономико-геологической оценкой их оптимального технологического регламента и экономической рентабельности.

**ТОМТОРСКОЕ №-РЕДКОЗЕМЕЛЬНОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ И ПОПИГАЙСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ ИМПАКТНЫХ АЛМАЗОВ**

Уникальные месторождения Сибирской Арктики – Томторское, ниобий-редкоземельных металлов (Толстов, Гунин, 2001; Толстов и др., 2014, 2017), и Попигайское – алмаз-лонсдейлитового сырья, природного нанополнструктурированного материала с уникальными технологическими характеристиками – являются практически неисчерпаемыми источниками высоколиквидных видов минерального сырья, но нуждаются в опережающих научно-технологических работах с целью вовлечения их в эффективное и экологически безопасное промышленное освоение (Похиленко и др., 2012; Крюков и др., 2016).

Общие прогнозны ресурсы **Томторского месторождения** колоссальны:  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  – 73.6 млн т,  $\text{TR}_2\text{O}_3$  – 153.7 млн т,  $\text{P}_2\text{O}_5$  – около 2 млрд т. По ресурсам редких элементов и их концентрациям Томторское месторождение является безусловным лидером нашей планеты (Похиленко, Толстов, 2012; Толстов и др., 2014). В мире такие объекты редки, поэтому Томтор по праву стоит в одном ряду с месторождениями-гигантами, такими как Витватерсранд или Сухой лог (золото), Чуккамата (медь), Норильская группа (медь, никель, платиноиды), заняв лидерство в группе РЗЭ-объектов, опередив месторождения ниобия (Араша, Бразилия) и редких земель (Маунтин-Пасс, США; Баюнь-Обо, Китай). Геологическими работами закрыто лишь около 40 км<sup>2</sup> территории Томторского массива, общая площадь которого составляет около 250 км<sup>2</sup> (фиг. 1).

Неподалеку от массива Томтор расположен подобный по происхождению массив Богдо, а также еще не вскрытые массивы Чюемпе, Буолкала, Уэле и редкоземельная зона Чымара. Из них слабо изучены только массив Богдо и редкоземельная зона Чимара, остальные объекты даже не вскрывались бурением, что многократно повышает рудные перспективы всего района (Толстов, 2006).

Опережающее доизучение Томторского месторождения и научно-методическое сопровождение его освоения позволит обеспечить Россию полным ассортиментом редкоземельной продукции (Толстов и др., 2014, 2017). Уникальные параметры руды этого месторождения (табл. 2) диктуют необходимость детального изучения вещественного состава и разработки оптимальной схемы ее переработки, позволяющей переводить в товарную продукцию более 75% объема руды (табл. 3). Совершенствование технологии переработки позволит получать продукцию различных переделов (карбонаты РЗЭ), а также индивидуальные оксиды и высокочистую продукцию –

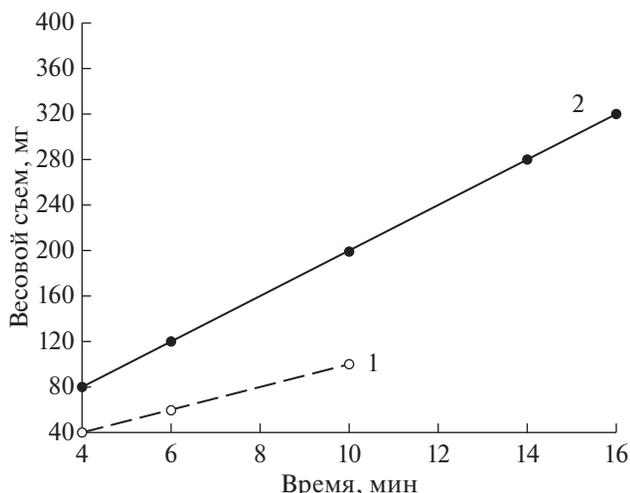


**Таблица 2.** Состав руды участка Буранный Томторского месторождения

№	Элемент	Содержание, %	№	Элемент	Содержание, %	№	Элемент	Содержание, %
1	ΣРЗО:	12.5	2	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.73	17	BaO	3.2
	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.6	3	Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.057	18	Na <sub>2</sub> O	0.15
	CeO <sub>2</sub>	6.3	4	Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	6.7	19	K <sub>2</sub> O	0.07
	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	0.56	5	Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.007	20	ZrO <sub>2</sub>	0.29
	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.17	6	TiO <sub>2</sub>	5.0	21	ThO <sub>2</sub>	0.15
	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.25	7	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.2	22	UO <sub>3</sub>	0.01
	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08	8	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.1	23	SiO <sub>2</sub>	3.8
	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.25	9	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	16.0	24	SO <sub>3</sub>	0.51
	Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	10	MnO	0.15	25	CO <sub>2</sub>	1.54
	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.15	11	PbO	0.28	26	F	0.5
	Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	12	ZnO	0.18	27	H <sub>2</sub> O	10.5
	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	13	CuO	0.02	28	C <sub>орг</sub>	0.86
	Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	14	MgO	0.12			
	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	15	CaO	2.55			
	Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.01	16	SrO	3.8			

**Таблица 3.** Продукты технологии переработки руды Томторского месторождения (Толстов и др. 2014)

Продукт	Чистота, %	Выход, с 1 т руды	Извлечение, %
Оксиды РЗМ			
В т.ч. La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.996	20.5 кг	78.8
CeO <sub>2</sub>	99.99–99.995	42.0 кг	66.9
Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	96	16.8 кг	77.7
Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	99.5–99.99	4.31 кг	77.7
Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.5–99.995	2.1 кг	82.8
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.99	0.66 кг	82.8
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.5–99.999	2.05 кг	81.9
Tb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.5–99.995	0.16 кг	80.6
Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.98	1.25 кг	82.8
Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.5–99.995	0.16 кг	82.5
Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.5–99.995	0.33 кг	82.5
Tm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.5–99.998	0.083 кг	83.3
Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.5–99.998	0.33 кг	82.9
Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.5–99.998	0.080 кг	80.1
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99.95–99.99	20.5 кг	77.9
ФН658	60	66 кг	85.0
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ТУ 95-148-77	99.9	0.57 кг	82.0
Тринатрий фосфат, Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O, ГОСТ 20176-77	Не менее 95%; оксид ванадия не более 0.005%	0.77 т	85.0
Al(OH) <sub>3</sub> марка Г-00	Класса +45–125 мкм 80–85%	0.22 т	85.0
TiO <sub>2</sub>	5–7% Al	28 кг	88



**Фиг. 2.** График времени работы и весового съема материала с обрабатываемой пластины кремния композиционными порошками на основе синтетических алмазов (линия 1) и импактных алмазов (линия 2).

2) создание непрерывной технологической цепочки полного цикла: “добыча Nb–TR руд–переработка–выпуск концентратов–разделение РЗМ–получение чистых металлов и продукции, содержащей TR”, опираясь только на отечественную сырьевую базу;

3) интеграция России в мировой рынок РЗМ с конкурентоспособной продукцией.

**Попигайское месторождение** представляет собой гигантский метеоритный кратер на севере Красноярского края на границе с Якутией. Его диаметр около 100 км, сформировался 35.7 миллиона лет назад в результате падения космического тела диаметром около 6 км (Масайтис и др., 1972, 1998). В момент удара породы-мишени – архейские гнейсы хапчанской серии – были переплавлены, а часть хорошо окристаллизованного графита, содержавшегося в них, в момент удара перешла в смесь двух высокобарических углеродных фаз – кубической (алмаз) и гексагональной (лонсдейлит), которые образуют природный нанополикристаллический агрегат с размером кристаллитов в десятки–первые сотни нанометров (Yelisseev et al., 2015, 2018; Ohfuji et al., 2016). Благодаря высокобарическому генезису и углеродному составу этот минерал с момента его открытия в

1971 г. (Масайтис и др., 1972) был назван импактным алмазом, и как алмаз фигурирует во всех документах, в частности в отчете SPG. Однако реально это не алмаз, этот минерал имеет иной генезис (мартенситный переход графита в высокобарические фазы в результате шокового метаморфизма), иной фазовый состав (комполит кубической и гексагональной фаз), иную структуру (нанополикристаллический агрегат).

Попигайский метеоритный кратер – единственное в мире месторождение нового вида минерального сырья. Благодаря полифазности и особенностям структуры (нанополиструктурированный алмаз-лонсдейлитовый агрегат) этот материал обладает уникальными технологическими характеристиками, существенно превосходящими таковые для природных и синтетических алмазов. В частности, как показали результаты проведенных нами в кооперации с коллегами из НАН Беларуси исследований, импактные алмазы обладают в 2–2.5 раза более высокой абразивной способностью и в 2.5–4 раза – более высокой износостойкостью, на 200–250°C более высокой термостойкостью и в 5–9 раз большей удельной поверхностью (Витязь и др., 2020; Сеньют и др., 2021). Набор этих характеристик открывает для импактных алмазов новые возможности применения в широком диапазоне технологий – от использования в буровом, режущем и шлифовальном инструменте до машиностроения, авиационной, космической, электронной, оптической и иных видов высокотехнологичной промышленности (фиг. 2, табл. 4). Освоение данного сырья, помимо прочего, направлено на импортозамещение и одновременно экспортоориентировано благодаря очень большим запасам Попигайского месторождения и практически неисчерпаемым прогнозным ресурсам месторождения, превышающим 1.2 триллиона карат.

Необходимость организации опережающего полномасштабного научно-методического и технологического сопровождения работ по вовлечению этого уникального объекта в промышленное освоение обусловлена следующими причинами:

– новый вид сырья обладает исключительными технологическими свойствами, превосходящими характеристики синтетических алмазов, но требуется проведение соответствующих работ по

**Таблица 4.** Сравнительные характеристики абразивной способности и абразивной устойчивости композиционных порошков на основе импактных и синтетических алмазов

Характеристика композиционного порошка		Обрабатываемый материал	Удельный съём материала, мг/мин	Стойкость, мин
Fe-Ti/имп. алм.	5/50 мкм	Кремний	35.4	>30
Fe-Ti/АСМ	5/50 мкм	Кремний	17.8	14

масштабному внедрению этого материала в современные технологии;

– этот вид сырья не представлен на рынке, поэтому нет обоснованной рыночной цены, нет объективных оценок спроса, поэтому необходимы экономические исследования, сюда же входят вопросы энергоснабжения, логистики, социальные вопросы;

– разработанная ранее (в 80-е гг. прошлого века) технология обогащения коренных руд устарела и диктует необходимость ее обновления с учетом современных требований экологической безопасности, без чего невозможно начинать освоение месторождения.

Решение этих вопросов позволит в кратчайшие сроки получить неисчерпаемый источник нового вида сырья при производстве конструкционных и функциональных композиционных материалов нового поколения.

Запасы импактных алмазов в Попигайском кратере практически неисчерпаемы: только на двух мелких его фрагментах, на которых проведена разведка, они составляют более 270 миллиардов каратов, что более чем в 50 раз превышает все известные запасы обычных алмазов в мире. Но основная часть территории кратера не опробована, и есть большая вероятность обнаружения более высоких содержаний этого сырья и широкие возможности дальнейшего наращивания его запасов (Вишневский и др., 1997).

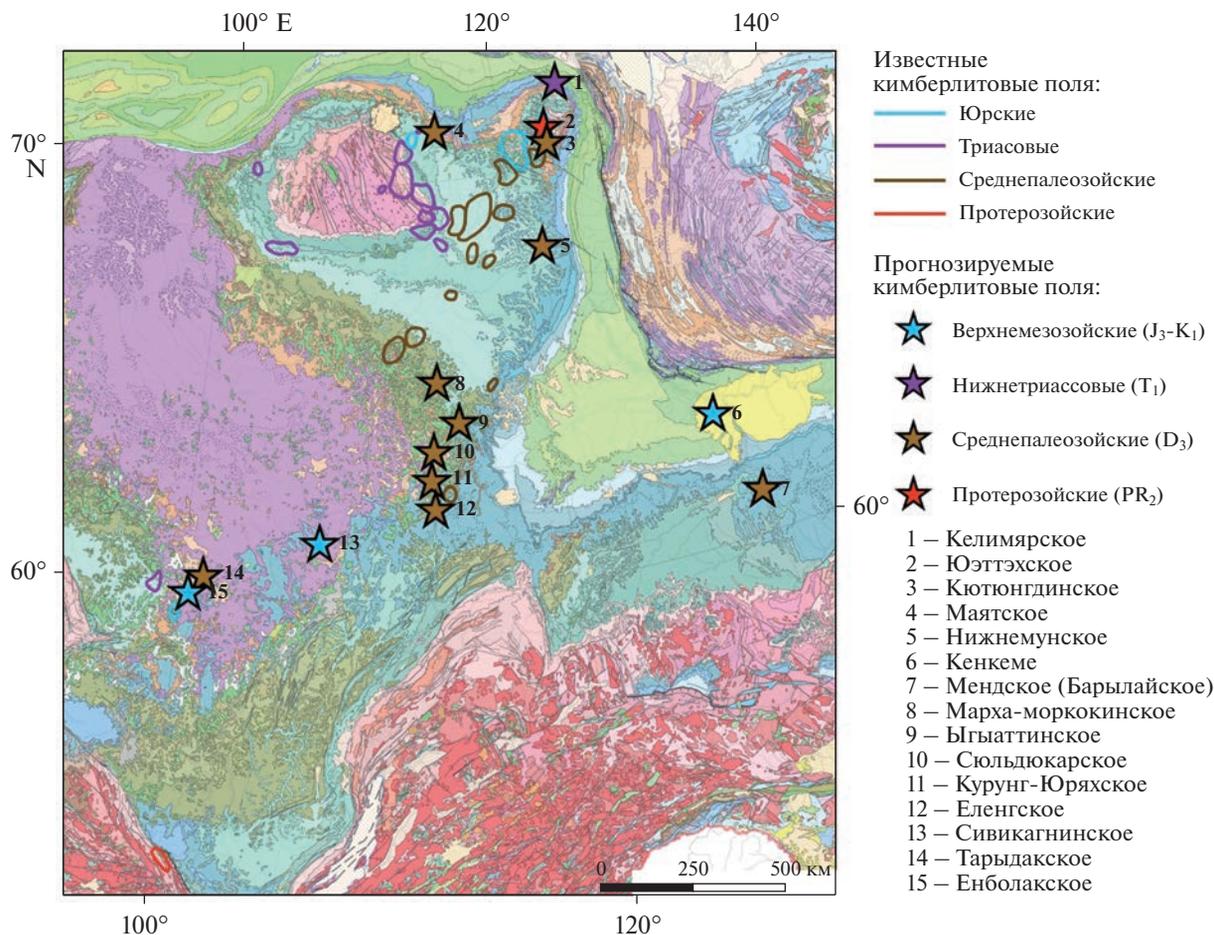
Учитывая: а) уникальные технологические характеристики импактных алмазов; б) их практически неисчерпаемые запасы; в) сосредоточенность на локальной территории, разработка Попигайского месторождения является реальной альтернативой китайским синтетическим алмазам. Более того, на сегодняшний день это лучший абразивный материал для применения в широком диапазоне современных технологий, которые уже не удовлетворяют характеристики синтетических алмазов. Разработка Попигайского месторождения возможна на длительную перспективу на месте добычи вахтовым методом. Технология обогащения достаточно компактна и предусматривает дробление породы (тагамита) и извлечение полезного компонента гравитационными методами, поскольку велика разница в его плотности ( $3.5 \text{ г/см}^3$ ) и вмещающей породы (около  $2.7 \text{ г/см}^3$ ). Месторождение импактных алмазов Попигайского кратера – единственное в мире, и Россия может и должна воспользоваться этим монопольным положением.

**Основные перспективы коренной алмазоносности Сибирской платформы, включая ее арктические территории, связываются с кимберлитами среднепалеозойского возраста. В период с 70-х гг. прошлого столетия до текущего десятилетия специалисты ИГиГ СО АН СССР, а с 1992 – ИГМ**

СО РАН проводили комплексные исследования распределения индикаторных минералов мантийного происхождения в разновозрастных кимберлитах и промежуточных осадочных коллекторах Сибирской платформы (Pokhilenko et al., 1999; Афанасьев и др., 2010, 2011а, 2011б, 2013; Добрецов, Похиленко, 2010; Afanasiev, Pokhilenko, 2022; Pokhilenko et al., 2022). Было показано, что промышленные уровни алмазоносности имеют кимберлиты среднепалеозойского возраста, что связывалось с масштабным воздействием сублитосферных базитовых расплавов Сибирского суперплюма на границе пермского и триасового периодов на корневые части литосферной мантии и уничтожением содержащихся в них алмазов (Pokhilenko et al., 1999, 2022). Анализ полученных результатов полевых и лабораторных исследований показал, что наиболее надежную информацию о возрасте и потенциальной алмазоносности прогнозируемых кимберлитов несут содержащиеся в них Sr-пиропы. С учетом этого обстоятельства был проведен анализ распределения этих минералов в разновозрастных промежуточных коллекторах Сибирской платформы, и по его результатам были выделены участки с четкими признаками присутствия новых полей алмазоносных кимберлитов среднепалеозойского возраста (фиг. 3).

Для выявления прогнозируемых на Сибирской платформе, в первую очередь в пределах ее арктических и субарктических регионов, богатых алмазами кимберлитов среднепалеозойского возраста необходимо применение более эффективных методик прогнозирования и поисков алмазов, адаптированных к существенно более сложным геологическим условиям новых перспективных территорий. Это обуславливает острую необходимость скорейшей консолидации усилий и компетенций всех ведомств и организаций для целей срочного выявления новых крупных коренных месторождений алмазов. Для решения этой задачи весьма полезным будет привлечение специалистов и компетенций Российской академии наук, и в первую очередь ее Сибирского отделения, имеющих успешный опыт проведения таких работ как в России, включая арктические регионы Сибирской и Восточно-Европейской платформ, так и в зарубежных странах. Поскольку со времени начала поисковых работ на алмазы до начала промышленной эксплуатации выявленных месторождений проходит, как правило, не менее 12–15 лет, активные совместные работы необходимо начинать немедленно.

С учетом существенного осложнения ситуации с сырьевой базой отечественной алмазодобывающей промышленности, начиная уже с 2030 г. по причине последовательного исчерпания экономически качественных балансовых запасов необходима постановка опережающих работ по выявлению новых объектов с алмазным сырьем в пре-



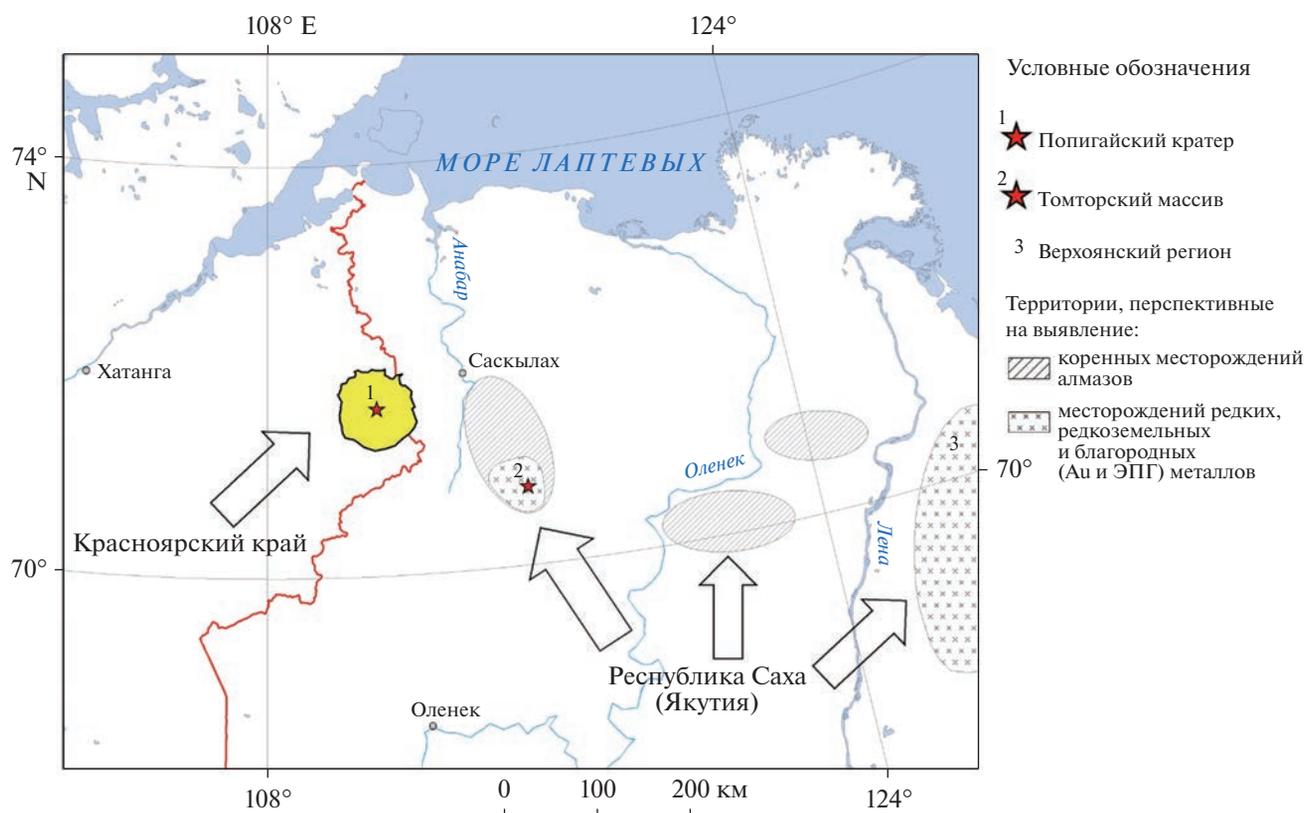
**Фиг. 3.** Схема расположения участков, перспективных на выявление новых кимберлитовых полей в пределах Сибирской платформы. К перспективным на выявление кимберлитов с промышленной алмазоносностью относятся участки 2–5, 7–12, 14.

делах Сибирской платформы, в том числе и в ее арктических регионах (фиг. 3). В частности, в верховьях правых притоков реки Анабар в районе Уджинского поднятия, а также на территориях западного и южного обрамления Кютюнгинского прогиба установлены прямые признаки присутствия новых полей кимберлитов среднепалеозойского возраста, содержащих высокопродуктивные тела. Для их выявления необходимо проведение тематических работ прогнозно-поискового характера с использованием научно-методического и экспертного сопровождения специалистов институтов Сибирского отделения РАН.

**ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ**

В двух документах по Арктической зоне РФ: “Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года” и “Стратегия развития Арктической зоны РФ и обеспечение национальной безопасности на период до 2035 года”, утвержденных Указами Пре-

зидента РФ 5 марта и 26 октября 2020 соответственно, особое внимание уделяется необходимости развития сырьевой базы добывающей промышленности Арктики. В частности, в Разделе 5 первого документа отмечено: “Основными национальными интересами Российской Федерации в Арктике являются: (...) пункт 5 г) развитие Арктической зоны Российской Федерации в качестве стратегической ресурсной базы и ее рациональное использование в целях ускорения экономического роста Российской Федерации”. Во втором документе указывается на необходимость освоения Попигайского месторождения импактных алмазов в Арктической зоне Красноярского края, Томторского месторождения редких и редкоземельных металлов, а также развития сырьевой базы алмазов в арктических районах Республики Саха (Якутия), благородных металлов – в арктических районах Республики Саха (Якутия), Магаданской области и Чукотского АО. На текущий период имеются серьезные предпосылки создания уникальной в мировом масштабе сырье-



**Фиг. 4.** Схема расположения месторождений редких и редкоземельных металлов, импактных алмазов и участков, перспективных на выявление месторождений ювелирных алмазов и благородных металлов на территории Лено-Хатангского междуречья Арктической зоны Сибири.

вой базы добывающей промышленности редких и редкоземельных металлов, уникального по технологическим характеристикам абразивного алмаз-лонсдейлитового сырья, выявления нового крупного района алмазоносных кимберлитов на севере Сибирской платформы, а также значительного наращивания МСБ благородных металлов в Арктической зоне Восточной Сибири (Крюков и др., 2016; Похиленко и др., 2016) (фиг. 4).

Наиболее подготовленным к получению конечного продукта – востребованных промышленностью и рынком соединений лития – является вариант переработки Li-содержащих рассолов Ангаро-Ленского бассейна. В связи с ожидаемым стремительным ростом потребления лития в мире (по данным Международного Энергетического Агентства в 42 раза к 2040 г., если взять за единицу потребление лития в 2020 г. (Доклад IEA, декабрь 2021)), острым ростом дефицита лития на мировом рынке начиная с 2024 г., резким ростом цен на литий (более чем в 6 раз последние пять лет) представляется перспективным диверсифицировать варианты производства лития. Для этого необходимо включить в разрабатываемую программу освоение наиболее перспективных с экономи-

ческой точки зрения рудных и техногенных месторождений этого металла.

Для ускоренной реализации задач по развитию производства лития в Сибири и России в целом следует в максимально короткие сроки привлечь и обеспечить (материально и инструментально) сохранившиеся остатки высококвалифицированных специалистов из профильных институтов СО РАН (геологов, химиков-технологов, экономистов) для создания реально реализуемой программы работ по данному направлению.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптимальным вариантом решения обсуждаемых в настоящей статье проблем явилось бы создание государственной программы по развитию системы стратегических геологических исследований, нацеленной на наращивание банка “поисковых заделов” по наиболее важным для развития современных технологий и экономики страны в целом стратегическим видам полезных ископаемых с активным участием в этой программе профильных академических институтов Минобрнауки РФ. К задачам, решаемым профильными академическими институтами в рамках такой

программы, относились бы: 1) участие в выборе и ранжировании территорий для последующего проведения на них прогнозно-оценочных работ; 2) научное, экспертное и аналитическое сопровождение прогнозно-оценочных работ, нацеленных на наращивание государственного банка надежных и привлекательных для недропользователей “поисковых заделов”; 3) участие в разработке новых и совершенствование имеющихся технологий переработки сложных типов природных и техногенных руд.

Для обеспечения условий решения этих задач необходимо воссоздать в стадийности всего процесса геологического изучения недр стадию тематических прогнозных (ревизионных) и прогнозно-минерагенических работ, нацеленных на объективное и надежное выделение объектов для проведения дальнейших поисковых работ. Работы, входящие в эту стадию, не требуют больших затрат времени и средств, однако именно такие работы многократно снижают риски неудач дорогостоящих и длительных поисковых работ.

Для участия профильных академических институтов в научном, экспертном и технологическом обеспечении тематических, прогнозных, прогнозно-минерагенических работ, а также работ по созданию новых и совершенствованию имеющихся необходимо предусмотреть выделение соответствующих бюджетных средств, достаточных для обеспечения этих работ.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках программ базовых проектов госзаданий Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (№ 122041400157-9) и Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьев В.П., Агашев А.М., Похиленко Н.П.* Основные черты истории и условий формирования ореолов индикаторных минералов кимберлитов Сибирской платформы // Геология рудн. месторождений. 2013. Т. 55. № 4. С. 295–304.
- Афанасьев В.П., Лобанов С.С., Похиленко Н.П., Коптиль В.И., Митюхин С.И., Герасимчук А.В., Помазанский Б.С., Горев Н.И.* Полигенез алмазов Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2011а. Т. 52. № 3. С. 335–353.
- Афанасьев В.П., Похиленко Н.П., Лобанов С.С.* // Россыпная алмазоносность Сибирской платформы: возрастные уровни и возможные источники питания // Геология рудн. Месторождений. 2011б. Ч. 53. № 6. С. 538–542.
- Бежанова М.П., Стругова Л.И.* Ресурсы, запасы, добыча, потребление и цены важнейших полезных ископаемых мира (на начало 2014 г.) // Москва, Изд. ОАО “ВНИИЗАРУБЕГЕОЛОГИЯ”, 2015. 160 с.
- Бортичков Н.С., Гамянин Г.Н., Викентьева О.В., Прокопьев В.Ю., Прокопьев А.В.* Золото-сурьмяные месторождения Сарылах и Сентачан (Саха-Якутия): пример совмещения мезотермальных золото-кварцевых и эпitherмальных антимонитовых руд. // Геология рудн. месторождений. 2010. Т. 52. № 5. С. 381–417.
- Витязь П.А., Сенють В.Т., Жорник В.И., Валькович И.В., Ковалева С.А., Мосунов Е.И., Афанасьев В.П.* Синтез нанокompозита на основе импактных алмазов и карбида кремния в условиях высоких давлений и температур // Механика машин, механизмов и материалов. 2020. № 4 (53). С. 44–51.
- Вишневский С.А., Афанасьев В.П., Аргунов К.П., Пальчик Н.А.* Импактные алмазы – их особенности, происхождение и значение. Новосибирск: СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. 53 с. (рус.-англ.).
- Владимиров А.Г., Ляхов Н.З., Загорский В.Е., Макагон В.М., Кузнецова Л.Г., Смирнов С.З., Исупов В.П., Белозеров И.М., Уваров А.Н., Гусев Г.С., Юсупов Т.С., Анникова И.Ю., Бескин С.М., Шокальский С.П., Михеев Е.И., Котлер П.Д., Мороз Е.Н., О.А. Гаврюшкина.* Литиевые месторождения сподуменовых пегматитов Сибири // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. № 1. С. 3–20.
- Владимиров А.Г., Ляхов Н.З., Исупов В.П., Загорский В.Е., Гусев Г.С.* Литиевые месторождения сподуменовых пегматитов Сибири и инновационные технологии в электрохимической энергетике // Разведка и охрана недр. 2011. № 6. С. 13–19.
- Владимиров А.Г., Загорский В.Е., Шварцев С.Л., Исупов В.П., Смирнов С.З., Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Волкова Н.И., Гертнер И.Ф., Макагон В.М., Кузнецова Л.Г., Анникова И.Ю., Колпакова М.Н., Михеев Е.И., Котлер П.Д., Гаврюшкина О.А.* Геохимические тенденции концентрирования лития в земной коре и на ее дневной поверхности // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 3. С. 59–62.
- Гусев Г.С., Гуцин А.В., Межеловский Н.В. и др.* Два типа редкометалльного оруденения на территории России: геодинамические модели формирования // Разведка и охрана недр. 2012. № 2. С. 38–43.
- Добрецов Н.Л., Похиленко Н.П.* Минеральные ресурсы Российской Арктики и проблемы их освоения в современных условиях // Геология и геофизика. 2010. 51. № 1. С. 126–141.
- Емельянов Е.Л., Макагон В.М., Перфильев В.В., Шмакин Б.М.* Геолого-экономическая характеристика Восточно-Саянской редкометалльной провинции // Стратегия использования и развития минерально-сырьевой базы редких металлов России в XXI веке: Матер. междунар. симп. М.: Изд. ВИМС МПР. 1998. С. 59–61.
- Загорский В.Е., Владимиров А.Г., Макагон В.М., Кузнецова Л.Г., Смирнов С.З., Дьячков Б.А., Анникова И.Ю., Шокальский С.П., Уваров А.Н.* Крупные поля сподуменовых пегматитов в обстановках рифтогенеза и постколлизонных сдвигово-раздвиговых деформаций континентальной литосферы // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 2. С. 303–322.
- Загорский В.Е., Кузнецова Л.Г.* Геохимия сподуменовых пегматитов и щелочно-редкометалльных метасоматитов // Новосибирск: Наука, 1990. 140 с.
- Игнатов П.А., Еременко Р.У., Толстов А.В., Овчинников И.М.* Перспективы выявления месторождений скандия в Якутской алмазоносной провинции // Горный журнал. 2022. № 7. С. 17–21.
- Коноплев А.Д., Толстов А.В., Васильев А.Т., Нечелюстов Г.Н., Кузьмин В.И., Скляднева В.М., Дубинчук В.Т., Коноплева Е.В., Сидоренко Г.А.* Особенности локализации редкометалльного оруденения на месторождении

- Томтор // Редкометалльно-урановое рудообразование в осадочных породах. Сборник научных трудов. Москва, 1995. С. 223–241.
- Краченко С.М., Беляков А.Ю., Кубышев А.И., Толстов А.В.* Скандиево-редкоземельно-иттриево-ниобиевые руды – новый тип редкометалльного сырья // Геология рудн. месторождений. 1990. Т. 32. № 1. С. 105–109.
- Крюков В.А., Толстов А.В., Афанасьев В.П., Самсонов Н.Ю., Крюков Я.В.* Обеспечение Российской промышленности высокотехнологичной сырьевой продукцией на основе гигантских месторождений Арктики – Томторского ниобий-редкоземельного и Попигаевского сверхтвердого абразивного материала // Север и Арктика в новой парадигме мирового развития. Лузинские чтения, 2016. С. 204–206.
- Кузнецова Л.Г., Прокофьев В.Ю.* Петрогенез аномально богатых литием сподуменовых аплитов месторождения Тастыг (Сангиленское нагорье, Республика Тыва) // Докл. РАН. 2009. Т. 428. № 6. С. 786–791.
- Кузнецова Л.Г., Шокальский С.П.* Месторождения лития в редкометалльных пегматитах Республики Тыва // Литий России: минерально-сырьевые ресурсы, инновационные технологии, экологическая безопасность: Матер. Всерос. научно-практ. совещ. с междунар. участием. Новосибирск, 24–26 мая 2011 г. Издательство СО РАН, 2011. С. 65–70.
- Лапин А.В., Толстов А.В.* Окислительный и восстановительный этапы формирования зоны гипергенеза карбонатитов и их рудоносность // Геология рудн. месторождений. 1991. Т. 33. № 4. С. 81–91.
- Макагон В.М.* Литиевые месторождения в редкометалльных пегматитах Восточно-Саянского пояса // Литий России: минерально-сырьевые ресурсы, инновационные технологии, экологическая безопасность: Матер. Всерос. научно-практ. совещ. с междунар. участием. Новосибирск, 24–26 мая, 2011г. Издательство СО РАН, 2011. С. 77–81.
- Макагон В.М., Ленин В.С., Брандт С.Б.* Рубидий-стронциевое датирование редкометалльных пегматитов Вишняковского месторождения (Восточный Саян) // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 12. С. 1783–1789.
- Масайтис В.Л., Гневушев М.А., Футергендлер С.И.* Алмазы в импактиках Попигаевского метеоритного кратера // Зап. ВМО. 1972. Ч. 101. В.1. С. 108–112.
- Масайтис В.Л., Мащак М.С., Райхлин А.И., Селивановская Т.В., Шафрановский Г.И.* Алмазоносные импактиты Попигаевской астроблемы // Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 1998. 179 с.
- Никифорова З.С., Толстов А.В.* Золотоносные россыпеподобные формации востока Сибирской платформы: происхождение и перспективы // Геология рудн. месторождений. 2022. Т. 64. № 2. С. 165–190.
- Похиленко Н.П., Афанасьев В.П., Агашев А.М., Мальковец В.Г.* Перспективы выявления новых коренных месторождений алмазов на севере Сибирской платформы // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: Матер. Всерос. науч.-практ. конф. Якутск, Издательский дом СВФУ, 2015. С. 376–379.
- Похиленко Н.П., Афанасьев В.П., Толстов А.В., Ягольницер М.А.* Импактные алмазы – новый вид высокотехнологичного сырья // ЭКО. 2012. № 12 (462). С. 5–11.
- Похиленко Н.П., Крюков В.А., Толстов А.В., Самсонов Н.Ю.* Создание сильной редкоземельной промышленности: без госкорпораций не осилить // ЭКО. 2016а. № 8 (506). С. 25–36.
- Похиленко Н.П., Крюков В.А., Толстов А.В., Самсонов Н.Ю.* Томтор как приоритетный инвестиционный проект обеспечения России собственным источником редкоземельных элементов // ЭКО. 2014. № 2 (476). С. 22–35.
- Похиленко Н.П., Толстов А.В.* Перспективы освоения Томторского месторождения комплексных ниобий-редкоземельных руд // ЭКО – Всероссийский экономический журнал. 2012. № 11. С. 17–27.
- Похиленко Н.П., Толстов А.В., Афанасьев В.П., Самсонов Н.Ю.* Новые механизмы государственного управления минерально-сырьевой базой стратегических полезных ископаемых Арктической зоны Сибири и Дальнего востока // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2016б. № 5. С. 60–63.
- Сенють В.Т., Витязь П.А., Жорник В.И., Валькович И.В., Афанасьев В.П.* Изучение влияния состава композитов на основе спеченного импактного алмаза на их износостойкость при обработке карбида кремния // Механика машин, механизмов и материалов. 2021. № 4 (57). С. 63–70.
- Толстов А.В.* Главные рудные формации Севера Сибирской платформы. М. ИМГРЭ, 2006. 212 с.
- Толстов А.В., Гунин А.П.* Комплексная оценка Томторского месторождения // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2001. № 11. С. 144–160.
- Толстов А.В., Похиленко Н.П., Лапин А.В., Крюков В.А., Самсонов Н.Ю.* Инвестиционная привлекательность Томторского месторождения и перспективы ее повышения // Разведка и охрана недр. 2014. № 9. С. 25–30.
- Толстов А.В., Похиленко Н.П., Самсонов Н.Ю.* Новые возможности получения редкоземельных элементов из единого арктического сырьевой источника // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Химия. 2017. Т. 10. № 1. С. 125–138.
- Толстов А.В., Самсонов Н.Ю.* Томтор: геология, технологии, экономика // ЭКО. 2014. № 2 (476). С. 36–44.
- Afanasyev V.P., Pokhilenko N.P.* Approaches to the diamond potential of the Siberian Craton: a new paradigm // Ore Geol. Rev. 2022. V. 147. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104980>
- Ohfuji H., Irifune T., Litasov K.D., Yamashita T., Isobe F., Afanasyev V.P., Pokhilenko N.P.* Natural occurrence of pure nano-polycrystalline diamond from impact crater // Scientific Reports. 2015. V.5. Art.14702.
- Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., Kuligin S.S., Shimizu N.* Peculiarities of distribution of pyroxenite paragenesis garnets in Yakutian kimberlites and some aspects of evolution of the Siberian craton lithospheric mantle // Proc. 7<sup>th</sup> Intern. Kimberlite Conf. Cape Town, Red Roof Design. 1999. V. 2. P. 790–707.
- Pokhilenko N.P., Afanasyev V.P., Agashev A.M., Pokhilenko L.N., Tychkov N.S.* Lithospheric mantle composition and structure variations under the Siberian Platform kimberlite fields of different ages // Geodynamics & Tectonophysics. 2022. 13 (4). 0666.
- Yelisseev A., Khrenov A., Afanasyev V., Pustovarov V., Gromilov S., Panchenko A., Pokhilenko N., Litasov K.* Luminescence of natural nanomaterial: Impact diamonds from the Popigai crater // Diamond and Related Materials. 58. 2015. P. 69–77.
- Yelisseyev A.P., Afanasyev V.P., Gromilov S.A.* Yakutites from the Popigai meteorite crater // Diamond and Related Materials. 2018. V. 89. P. 10–17.