

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СУВЕРЕНИТЕТА РОССИИ С УЧЁТОМ СОСТОЯНИЯ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ

© 2023 г. Л. И. Леонтьев^{а,*}, О. В. Заякин^{б,**}, А. И. Волков^{с,***}

^аРоссийская академия наук, Москва, Россия

^бИнститут металлургии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

^сЦНИИчермет им. И.П. Бардина, Москва, Россия

*E-mail: leo@presidium.ras.ru

**E-mail: zferro@mail.ru

***E-mail: rhenium@list.ru

Поступила в редакцию 11.06.2023 г.

После доработки 16.06.2023 г.

Принята к публикации 19.06.2023 г.

В статье приведены данные по объёмам импортируемых и экспортируемых материалов металлургической отрасли России. Отечественная промышленность, несмотря на богатую минерально-сырьевую базу, по целому перечню рудных концентратов, оксидов и других соединений, металлов и ферросплавов, а также по отдельным маркам стали и металлическим изделиям зависит от импортных поставок, что приводит к высоким рискам в сфере безопасности и устойчивого развития государства в целом. Авторами проанализирована ситуация, связанная с зависимостью от поставок из-за рубежа рудных материалов, металлов и сплавов, приведены примеры перспективных технологических вариантов развития отечественного производства с использованием собственной минерально-сырьевой базы.

Ключевые слова: металлургия, минерально-сырьевая база, металлы, сплавы, импорт, экспорт, технология производства, сталь, легирование.

DOI: 10.31857/S086958732307006X, EDN: RQPSGG

Россия, несмотря на наличие богатой минерально-сырьевой базы [1], по целому перечню рудных концентратов, оксидов и других соединений, металлов и ферросплавов, а также по отдельным маркам стали и металлическим изделиям зависит от импортных поставок. В силу большого объёма производства эта зависимость особенно

заметна в чёрной металлургии, являющейся основным потребителем ряда цветных, в том числе редких, металлов, используемых для раскисления, легирования и модифицирования структуры чугуна и стали. Сплавы железа составляют основу конструкционных материалов для объектов инфраструктуры, зданий, сооружений, транспорта,



ЛЕОНТЬЕВ Леопольд Игоревич — академик РАН, советник президиума РАН. ЗАЯКИН Олег Вадимович — член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией стали и ферросплавов, главный научный сотрудник ИМЕТ УрО РАН. ВОЛКОВ Антон Иванович — кандидат химических наук, директор научного центра комплексной переработки сырья им. Н.П. Лякишева ЦНИИчермет им. И.П. Бардина.

машино- и станкостроения, химической промышленности, оборонной отрасли. Поэтому зависимость от того или иного вида сырья приводит к высоким рискам в сфере безопасности и устойчивого развития государства в целом.

В таблице 1 представлена доля импорта в объёме потребления ряда материалов, поставки которых в значительной степени зависят от зарубежных производителей [2]. Для некоторых материалов (вольфрамовый концентрат, пигментный диоксид титана, ферромолибден) в силу дальних расстояний между поставщиками и потребителями сложилась ситуация, при которой отечественное сырьё отправляется на экспорт, при этом российские потребители вынуждены приобретать аналогичное импортное. Для ряда материалов (пентаоксид ванадия, циркониевый концентрат) такая ситуация обусловлена разницей в стоимости и качестве отечественной и зарубежной продукции.

Вынуждены констатировать, что по целому спектру материалов в России производится продукция первых переделов, которая отправляется на экспорт, перерабатывается за рубежом, а затем поступает обратно в виде продукции глубокой степени переработки или готовых изделий. Так, концентрат неразделённых редкоземельных металлов (РЗМ) поступает за рубеж, а по импорту мы получаем соединения, ряд индивидуальных РЗМ и готовые изделия (компоненты электроники, катализаторы, постоянные магниты, оптическое стекло, керамика, лигатуры и модификаторы, бытовая электронная техника, приборы и оборудование). Конвертерный шлак и технический пентаоксид ванадия частично поступают на экспорт, а по импорту Россия приобретает чистые пентаоксид и триоксид ванадия. Основная часть производимого феррохрома идёт на экспорт, а получаемые из него нержавеющая сталь и коррозионностойкие изделия приобретаются по импорту. Уникальный бадделеитовый концентрат практически полностью идёт на экспорт, а циркониевая керамика, огнеупоры, в том числе для вставок в стаканы разливки стали, и другие дорогостоящие изделия, например зубные протезы, импортируются. Основная часть ферромолибдена и ферровольфрама не находит спроса внутри России и отправляется на экспорт, в то же время мы наблюдаем большую зависимость от импортных поставок инструментальных быстрорежущих сталей, сталей для машиностроения, твёрдых сплавов, металлорежущего инструмента, в производстве которых используются вольфрам и молибден. Основная часть металлического титана, производимого в России, поступает зарубежным производителям самолётов (Boeing, Airbus). Подавляющее большинство российских гражданских авиалайнеров импортного производства (в лизинге).

Между тем по многим видам сырья в России имеется собственная сырьевая база. Недостаточность её использования обусловлена в ряде случаев низким качеством руд по сравнению с импортируемыми, отсутствием инфраструктуры и удалённостью месторождений.

Марганец. Марганец — один из важнейших компонентов сталей, причём как массовых, так и специальных. Он обеспечивает высокие потребительские свойства сплавов — повышенную прочность наряду с высокой пластичностью и вязкостью, низкий порог хладноломкости, немагнитность, оптимальный коэффициент теплового расширения, высокий уровень диссипативных свойств, способность к упрочнению и к формированию наноструктурированных композиций на поверхностях трения, обеспечивающих высокие трибологические свойства и низкий коэффициент трения при одновременном повышении износостойкости. Ситуация на рынке марганца целиком определяется уровнем его потребления в сталелитейном производстве [3]. Суммарный расход Mn при выплавке 1 т стали составляет около 10.4 кг.

Содержание марганца (%) в сталях различных марок

Углеродистые	0.5
Конструкционные	1.0
Высокопрочные низколегированные	1.5
Немагнитные	11
Нержавеющие (серия 200)	12
Сталь Гадфильда	13

Марганец относится к группе полезных ископаемых, имеющих важное стратегическое значение, однако Россия вынуждена импортировать товарную марганцевую руду, ферросплавы, металлический марганец, электролитический диоксид марганца, перманганат калия [4–6]. Объём импорта марганцевого концентрата составляет 1.1 млн т. Более 90% Mn используется в чёрной металлургии при выплавке стали в качестве раскислителя и легирующего элемента. С появлением электропечей получило развитие производство ферросиликомарганца как более эффективного раскислителя стали за счёт повышенного содержания кремния.

Роль марганца как легирующего элемента резко возрастает с развитием сталеплавильных технологий (электросталеплавильное производство, внепечная обработка стали, вакуумирование). При этом роль раскислителей переходит к кремнию, алюминию, кальцию. Одновременно наблюдается тенденция к увеличению объёма выпуска низкоуглеродистых сталей, в связи с чем в

Таблица 1. Некоторые импортируемые и экспортируемые материалы

Наименование материала	Доля импорта в потреблении, %	Доля экспорта от объёма производства, %
Сырьевые материалы		
Марганцевый концентрат	100	0
Диоксид марганца	100	0
Хромовый концентрат	32.8	0.1
Пентаоксид ванадия технический	0	42.6
Пентаоксид ванадия очищенный	100	0
Ильменитовый концентрат	97.2	4.6
Пигментный диоксид титана	67.5	51.1
Вольфрамовый концентрат	8.6	56.9
Молибденовый концентрат	36.9	0
Оксиды молибдена очищенные	~100	0
Ниобия пентаоксид	27.4	7.0
Коллективный концентрат РЗМ	~1.5	98.2
Соединения разделённых РЗМ	87.1	3.3
Циркониевые концентраты ($ZrSiO_4 + ZrO_2$)	93.9	96.0
Циркония диоксид	97.6	—
Металлы, ферросплавы и лигатуры		
Марганец металлический	100	0
Марганец электролитический	100	0
Ферромарганец низко- и среднеуглеродистый	100	0
Ферросиликомарганец	33.5	12.1
Феррохром	—	83.0
Хром металлический	—	90.0
Феррониобий	99.3	44.0
Феррованадий	2.5	21.7
Ферромolibден	61.4	94.0
Ферровольфрам	0	66.3
РЗМ в виде металлов	100	0
Тантал металлический	96.4	4.5
Висмут металлический	100	4.5
Стали		
Прокат из нержавеющей стали	79.2	13.2
Трубы из нержавеющей стали	59.0	—
Инструментальные быстрорежущие стали	до 100	—

Таблица 1. Окончание

Наименование материала	Доля импорта в потреблении, %	Доля экспорта от объёма производства, %
Машиностроительные (мартенситно-старееющие, подшипниковые, пружинные, высокопрочные, рельсовые)	до 70.5	3.1
Электротехническая сталь (прокат)	6.5	83.6
Немагнитные стали, материалы для наплавки износостойкого покрытия	90.0	—
Биметаллический листовой прокат	90.0	—
Толстолистовая легированная никелевая сталь для сосудов, работающих под давлением	75.0	—
Легированная и коррозионностойкая сталь для эксплуатации при высокой температуре	90.0	—
Сталь конструкционная криогенная	до 100	—

мире растёт спрос на металлический марганец и низкоуглеродистый ферромарганец [7].

В России ситуация с производством марганцевых ферросплавов за последние 15 лет изменилась в лучшую сторону, доля импорта в потреблении ферросиликомарганца снизилась с 80–90 до 40%; ферромарганца – с 40 до 13% (рис. 1). Не изменилась ситуация с металлическим марганцем, весь объём его потребления (свыше 60 тыс. т в год) покрывается за счёт импортных поставок.

Наша страна обладает крупной сырьевой базой марганцевых руд, входя в десятку мировых держателей их запасов, однако товарно-сырьевую продукцию не производит. В России промышленная добыча марганцевых руд не ведётся с 2013 г. С 2017 г. в стране проводится только их опытно-промышленная добыча; в 2020 г. её объёмы составили 188 тыс. т. Балансовые запасы марганцевых руд по состоянию на 01.01.2021 достигают 283.5 млн т, они заключены в недрах 27 месторождений, ещё на двух учтены только забалансовые запасы. В целом качество российских руд низкое: по содержанию марганца они относятся к бедным (среднее значение по месторождениям колеблется в пределах 6.6–31.1%), труднообогатимым, в них в значимом количестве содержатся вредные примеси (фосфор, железо, диоксид кремния). Основная часть запасов категорий А+В+С₁ (более 77.1%) заключена в месторождениях, сложенных карбонатными рудами, остальные – в объектах с окисленными (17.1%), смешанными (5.2%), оксидными (0.5%) рудами и в морских железомарганцевых конкрециях (0.1%). В связи с этим собственное производство марганцевых ферросплавов базируется на привозном сырье. Среди отечественных месторождений следует отметить прежде всего Усинское (Кемеровская область),

Порожнинское (Красноярский край), месторождения Урала, включая Полуночную группу (Свердловская область) и Парнокское месторождение (Республика Коми). Месторождения есть также в Алтайском крае, Архангельской, Иркутской и Оренбургской областях.

Отечественные руды имеют ряд особенностей по химическим и минералогическим характеристикам, что требует дополнительных научно-исследовательских работ, касающихся обогащения, подготовки к плавке и доработки технологических режимов производства сплавов [8]. К вопросу добычи и переработки марганцевых руд приступали неоднократно, однако до сих пор их добыча в России не осуществляется [9, 10]. В таблице 2 представлены проекты по организации марганцевого производства, действовавшие и планировавшиеся в последнее время. Как считают специалисты, убыточность планируемых проектов связана с их нацеленностью на получение традиционной многотоннажной товарной продукции (марганцевых ферросплавов), себестоимость которой оказывается выше, чем при переработке зарубежных богатых концентратов.

Хром. Основной сферой потребления хромовых руд выступает чёрная металлургия, где их используют для выплавки феррохрома. Феррохром, в свою очередь, служит легирующей добавкой при производстве сталей. Хром обладает высокими антикоррозионными свойствами и в качестве легирующего элемента входит в стали и сплавы многих марок. Содержание хрома в сталях в зависимости от назначения и предъявляемых к ним требований изменяется от десятых долей процента до 30–40%.

По состоянию на 01.01.2021 балансовые запасы хрома в России составили 51.8 млн т; они заклю-

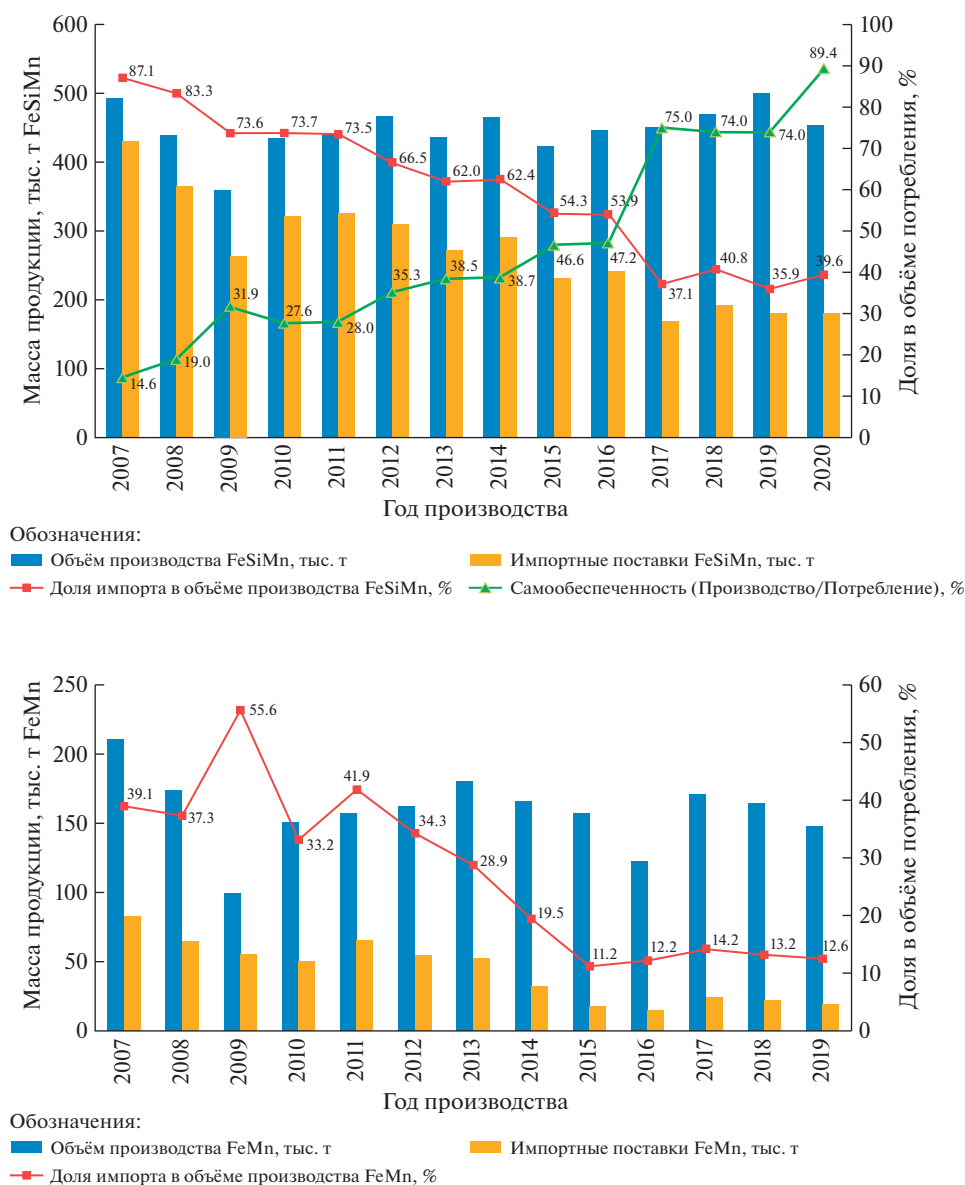


Рис. 1. Объёмы потребления и импортных поставок ферросиликомарганца и ферромарганца в России

чены в 33 коренных месторождениях и группе россыпей, учитываемых как единый объект. Качество российских хромовых руд низкое, по содержанию Cr_2O_3 они относятся к бедным (30–45%) и убогим (10–30%). В настоящее время отечественной промышленностью используются руды, не требующие обогащения, с содержанием Cr_2O_3 более 35%, но только четверть российских запасов соответствует этому уровню. Основные объёмы хромовых руд – почти 70% запасов страны сосредоточены в Карело-Кольском регионе (Республика Карелия и Мурманская область), где находятся крупнейшие в России Аганозёрское и Сопчеозёрское месторождения [11].

Ситуацию с импортозависимостью российской металлургии от хромового сырья нельзя охарактеризовать как напряжённую ввиду устойчивых экономических связей России с Казахстаном и появлением нового импортного потока из Южно-Африканской республики. Кроме того, собственная минерально-сырьевая база хромитов достаточна, производственные мощности по их добыче только наращиваются.

Более 90% российской добычи хромовых руд осуществляют два недропользователя – АО «ЧЭМК» и АО «Сарановская шахта «Рудная»»; эти же компании владеют основным объёмом запасов хромитов. При этом АО «ЧЭМК» выступает управляющей компанией АО «Сарановская шахта

Таблица 2. Проекты по добыче и переработке марганцевых руд в России

Месторождение	Предприятие	Статус проекта	Примечание
Усинское	ЧЕК-СУ.ВК	В 2015 г. реализация проекта приостановлена из-за прений о его экологической безопасности. Освоение отложено в 2017 г. Компания признана банкротом	Низкое содержание марганца (19%), повышенное содержание фосфора. Планировалось добывать до 1370 тыс. т руды в год. Мощность обогатительной фабрики 800 тыс. т по концентрату. Планируемое производство марганца металлического 80 тыс. т в год
Селезеньское	Западно-Сибирский электро-металлургический завод	Проект добычи перепрофилирован на переработку древесины, сырьё для завода поступает из Африки	Добыто всего 8 тыс. т руды, далее руды не оказалось
Парнокское	Челябинский электро-металлургический комбинат	Карьер законсервирован. Использование руды затруднено	Тяжёлые гидрогеологические условия болотистой местности и глинистый мелкодисперсный характер руды
Южно-Хинганское	Хэмэн—Дальний Восток	Эксплуатация не началась, сроки переносятся, проводятся исследования	Мелкое по запасам, низкое содержание марганца (21%). Планировалось добывать до 150 тыс. т в год
Железо-марганцевые конкреции Балтийского моря	Кингисеппский завод ферросплавов	Проект закрыт, завода больше не существует	Завод был перепрофилирован под производство ферромарганца, некоторое время работал на привозном сырье. Предполагалось получение оксидов марганца и металлического марганца из конкреций
Ниязгуловское 1	Уральское горно-рудное управление “Восток”	Промышленная добыча не ведётся. Проводятся подготовительные работы. Работает в опытном режиме	Проект был законсервирован в 1941 г. В 2008 г. вновь получена лицензия до 2022 г.
Громовское	Приаргунское производственное горно-химическое объединение (ППГХО)	ППГХО отказалось от расконсервации карьера. Громовский рудник на консервации	ППГХО вело разработку месторождения в период с 2003 по 2012 г. Однако в связи с низким содержанием марганца (17%) в руде горнодобывающее предприятие законсервировано
Порожинское			В малоосвоенном районе, высокое содержание фосфора. Низкое содержание марганца (19%)
Сейбинское	ГК “Георгиевский рудник”	Изучение технологических свойств руды, схемы переработки, подсчёт запасов	
Тынынское	Североуральская марганцевая компания	Готовится расконсервация карьера	Планируется добыть остаточные запасы месторождения (407 тыс. т) в течение трёх лет до 2027 г. Содержание марганца 20%

Таблица 2. Окончание

Месторождение	Предприятие	Статус проекта	Примечание
Дурновское	“Недра Сибири”	Работы прекращены из-за недостатка средств и трудностей по доразведке	Сложная структура рудных тел. Мелкое по запасам. Содержание марганца до 23%
Николаевское	“Иркутский марганец”	Добыча не ведётся. Ранее проводились поисковые работы, ведётся поиск финансирования	В 2017 г. лицензия аннулирована
Участок Марганцевый в Тугуро-Чумиканском районе Хабаровского края	“Транссервис”	В 2016 г. планировалось проведение ГРП с выявлением мелкого месторождения марганцевых руд	
	“Запсибруда”	В 2017 г. утверждён проект на проведение поисков марганцевых руд и попутных полезных ископаемых на Мунжинской площади в пределах лицензионного участка	ООО “Запсибруда” владеет лицензией на геологическое изучение и добычу марганцевых руд в юго-западной части Горной Шории на территории Таштагольского района Кемеровской области
	“Сибзолоторазведка”	В 2017 г. планировалось начало ГРП по проекту оценочных работ на марганцевые руды на Клевакинском участке в Свердловской области	
Мазульское		В настоящее время не эксплуатируется; карьер законсервирован	

“Рудная”» и ООО “Западно-Уральский хром”, являясь фактически монополистом хроморудной промышленности России.

В настоящее время в нашей стране выплавляют феррохром различных марок (~400 тыс. т), ферросиликохром товарный (~70 тыс. т) и передельный [12–16]. Ввиду небольших мощностей по производству нержавеющей стали существенная доля выпускаемого феррохрома поступает на экспорт (рис. 2). Россия занимает около половины мировых мощностей производства хрома металлического, входит в число мировых лидеров по производству низкоуглеродистого феррохрома.

Хромовые ферросплавы в основном используются при получении коррозионностойкой стали. Современный российский рынок металлургической продукции из нержавеющей стали характеризуется высокой зависимостью от импорта. В последние десять лет доля импорта в объёме потребления проката из нержавеющей стали составляла 55–80%, для труб из нержавеющей стали колебалась в пределах 37–70%. Так, в 2021 г. из 534 тыс. т потреблённого готового проката

423 тыс. т было поставлено по импорту, а из 104 тыс. т труб – 39 тыс. т.

За последние три десятилетия в России резко упало производство нержавеющей стали (с 826 до 200 тыс. т). Одна из причин отказа от выпуска отечественной коррозионностойкой стали – отсутствие качественного хромового сырья для получения низкоуглеродистого высокопроцентного феррохрома, который в соответствии с принятой технологией служит основным компонентом производства нержавеющей стали. Более 2/3 выплавляемого в России феррохрома имеет высокое содержание углерода. В этой связи необходимо отметить, что в настоящее время в мире широко используются технологические схемы с применением высокоуглеродистого феррохрома, например аргоно-кислородный процесс. Уже есть готовые отечественные технологии производства ферроникеля из местных окисленных никелевых руд со средним содержанием Ni~1.1%. При использовании этих ресурсов возможно организовать производство нержавеющей стали на основе аргоно-кислородного процесса. Ещё один вариант – проект получения феррохрома и нержавеющей

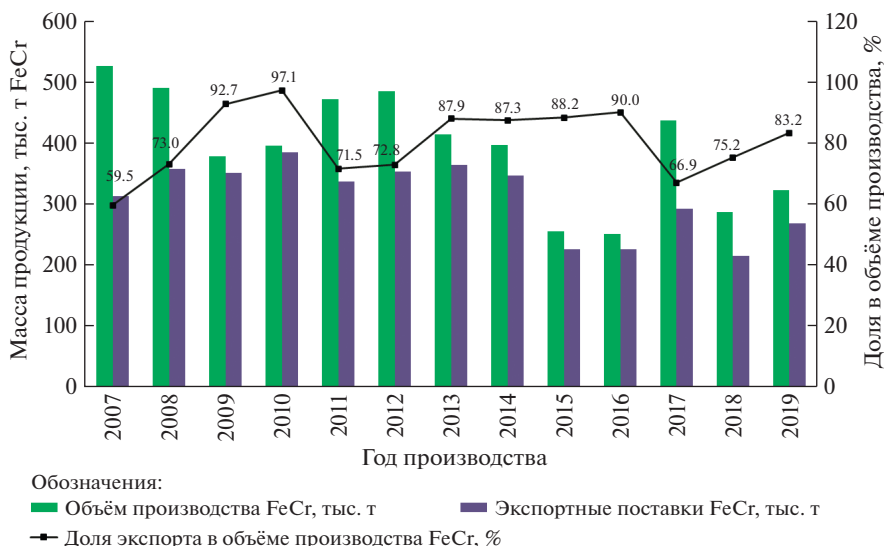


Рис. 2. Объем производства и экспортных поставок феррохрома в России

щей стали на базе энергетических мощностей Кольской АЭС.

В г. Волжском Волгоградской области в 2023 г. начато строительство комплекса “Русской нержавеющей компании” по производству плоского нержавеющей проката, совместного предприятия Трубной металлургической компании и Челябинского электрометаллургического комбината. Предполагаемая мощность — до 500 тыс. т проката в год. Строительство цеха холодной прокатки планируется завершить в 2025 г., а цехов горячей прокатки и сталеплавильного — в 2026 г.

Титан. Занимая одно из первых мест в мире по запасам титаносодержащего сырья (15% мировых), Россия почти не использует его для производства ценнейших продуктов — металлического титана и его диоксида. По состоянию на 01.01.2021 балансовые запасы составили 606.9 млн т TiO_2 , они заключены в 18 коренных (97% запасов) и 15 россыпных месторождениях, ещё два коренных и два россыпных содержат только забалансовые запасы.

Крупнейшие в стране запасы титана (48%) сосредоточены в Республике Коми, где они заключены в двух месторождениях: Ярегском нефтетитановом, руды которого (лейкоксен-кварцевые нефтеносные песчаники) богаты по содержанию TiO_2 (10.44%), но весьма труднообогащаемы, и Пижемском с менее богатыми (4.27% TiO_2) цирконильменит-лейкоксеновыми рудами. На долю Мурманской области приходится 20.5% запасов страны, где они сосредоточены в магматогенных месторождениях. В их рудах, связанных со щелочными породами (Хибинская группа и Ловозёрское), титан присутствует как попутный компонент, в рудах месторождения Юго-Восточная Гремяха, связанного с габброидами, как основ-

ной. В магматогенных месторождениях Забайкальского края (титаномagnetитовое Чинейское и апатит-ильменит-титаномagnetитовое Кручининское) сосредоточено 18.1% российских запасов. Аналогичные объекты формируют сырьевую базу Челябинской (5% запасов России, Медведёвское месторождение ильменит-титаномagnetитовых труднообогащаемых руд) и Амурской (3.7%, месторождение Большой Сэйим ильменит-титаномagnetитовых сравнительно легкообогащаемых руд) областей, а также Красноярского края (0.7%, титаномagnetитовые месторождения Подлысанской группы). Запасы Иркутской области (1% запасов страны) сосредоточены в слабосцементированных ильменитсодержащих песчаниках Тулунского месторождения.

Во всех остальных регионах России запасы титана связаны с россыпными месторождениями. Самые крупные из них — циркон-рутил-ильменитовые прибрежно-морские россыпи Центрального месторождения в Тамбовской области (1.1% запасов страны) и Туганского в Томской области (0.4%).

Освоенность российской сырьевой базы титана невысокая, в 2020 г. в разработку было вовлечено только 6% запасов, причём с извлечением этого металла в концентрат — всего 0.1%. Подготавливалось к освоению и разведывалось 27.3%, в нераспределённом фонде оставалось 66.7% запасов.

Единственным действующим источником титанового сырья в России служит Ловозёрское месторождение, при переработке руды которого на Соликамском магниевом заводе получают лопаритовый концентрат, а из него, в свою очередь, около 2.2 тыс. губчатого титана. В 2016 г. из-за

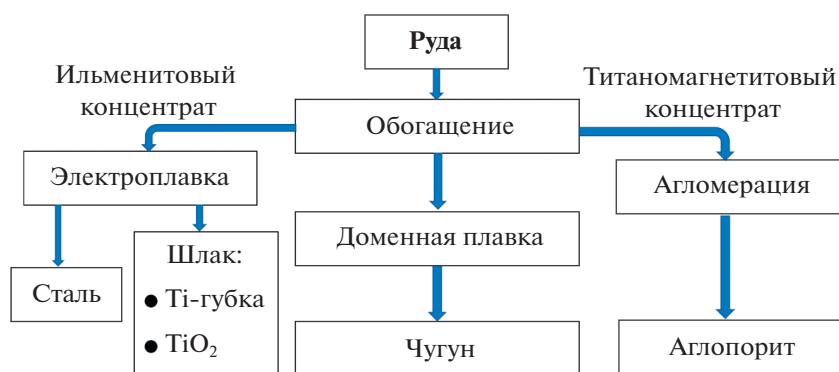


Рис. 3. Принципиальная схема переработки руды Медведёвского месторождения

неблагоприятной рыночной конъюнктуры и технологических трудностей законсервирован Олекминский рудник и горно-обогатительный комбинат, разрабатывавший Куранахское месторождение. В 2022 г. планировали начать получение концентрата на месторождении Большой Сейим. В марте 2023 г. производственные мощности по добыче руды на Куранахском месторождении были восстановлены. Планируемый объём производства — 300–400 тыс. т ильменитового концентрата в год. В опытном режиме работает Туганский ГОК «Ильменит», опытные партии ильменитового концентрата прошли технологические испытания для производства губчатого титана ВСМПО–АВИСМА. Рутитовый и лейкоксеновый концентраты применяют для получения сварочных электродов и проволоки.

В России сложилась парадоксальная ситуация: обладая большими запасами титана, страна закрывает значительную (97,4%) часть своих потребностей за счёт импортного сырья. Металлический титан производился ВМПО–АВИСМА в основном из украинского сырья (88% Вольногорский ГОК, Днепропетровская область). В случае отказа Украины сырьё приобретается в Индии, Австралии и других странах.

Пигментный диоксид титана до 2014 г. в России вообще не производился, а закупался на Украине, в Германии, Финляндии, Бельгии, Китае и других странах. Он используется в лакокрасочной промышленности, производстве пластмасс, бумаги, искусственных волокон, резины, катализаторов.

Импорт титановых концентратов в 2019 г. составил 304,5 тыс. т, а пигментного диоксида титана 53,6 тыс. т. В связи с этим разработка отечественных месторождений становится актуальной задачей [17–21].

ЗАО «Титановые инвестиции» — крупнейшее химическое предприятие Крыма функционирует с 1970 г. Главное направление его деятельности — производство пигментного TiO_2 . Среди попутных

продуктов — выпуск аммофоса и железного купороса, красного железистоокисного пигмента, используемого для изготовления красок и эмалей. На предприятии применяется сернокислотный способ переработки титановых концентратов (перовскитовые, сфеновые, ильменитовые концентраты и титановые шлаки). Предприятие работает на привозном сырье. Например, ильменитовые концентраты завозили с севера Украины. Продолжается их поступление из Канады, Норвегии и Австралии.

По данным Крымского гидрометцентра, в районе г. Армянска, в котором расположен завод «Титан», концентрации загрязнителей в атмосферном воздухе существенно превышают ПДК. Ежегодно образуются тысячи тонн газообразных отходов, золы и пыли, в том числе около 4 тыс. т твёрдых отходов в виде тончайших аэрозолей (диоксид титана, ильменит, аммофос, железный купорос, красный пигмент железистоокисный и др.). Промышленные стоки предприятия отводятся в кислотонакопитель-испаритель, который представляет собой отштурованный дамбой залив озера Сиваш. Среднее значение pH жидких промстоков, направляемых в кислотонакопитель, составляет 1,10–1,15, что свидетельствует об агрессивной кислотной среде. В связи с этим актуальной остаётся задача переработки ильменитовых и титаномагнетитовых концентратов по другой, наиболее эффективной и экологически безопасной технологии, позволяющей получать титановый шлак, чугун, ферротитан.

Ярегское нефтетитановое месторождение находится в Республике Коми. Руда содержит 58–73% кварца, 15–20% лейкоксена ($\text{TiO}_2 \cdot \text{SiO}_2$), 8–10% высоковязкой нефти. Общее количество TiO_2 в месторождении — 278,6 млн т. Разработкой технологической схемы переработки этих руд занимались ОАО «Ярега-Руда», ИМЕТ УрО РАН, ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН и др. Показана возможность переработки лейкоксеновых концен-

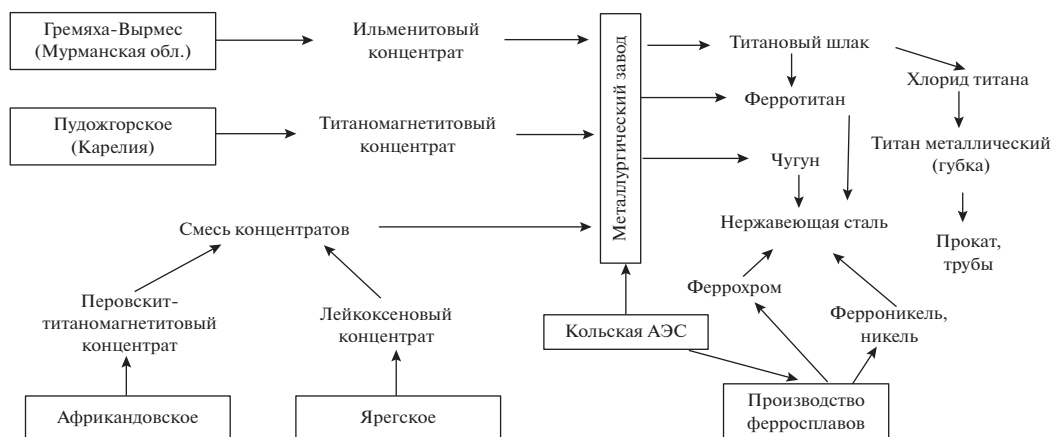


Рис. 4. Предлагаемая схема переработки титановых концентратов

тратов, полученных из руды по сульфатной и хлоридной технологиям.

Медведёвское месторождение ильменит-титаномагнетитовых руд расположено в Челябинской области, в 10 км от города Златоуста. В 1960–1970-е годы эти руды предполагалось использовать в качестве основного источника обеспечения сырьём титаново-пигментной промышленности, были проложены железная дорога и высоковольтная линия. Златоустовское обогатительное рудоуправление в составе обогатительной фабрики и аглофабрики, работавшее ранее на Кусинских рудах, должно было обеспечить первичную переработку руды с получением ильменитового и титаномагнетитовых концентратов, которые далее планировалось перерабатывать по схеме (рис. 3). Агломерат по железной дороге Бакал–Чусовая предполагалось отправлять на Чусовской металлургический завод для доменной плавки с получением ванадистого чугуна, а ильменитовый концентрат – той же дорогой в г. Березники на электроплавку для получения высокотитанового шлака, из которого планировалось производство титановой губки и пигментного диоксида. Позже разработка схемы была переориентирована на Копанское, более крупное месторождение, расположенное на западном склоне Южного Урала в пределах Челябинской области на территории Златоустовского и Саткинского районов. Запасы Копанского месторождения значительны – более 2 млрд т. Технология их переработки аналогична Медведёвским рудам.

К Копанскому месторождению приурочено месторождение титаносодержащих песков в бассейне реки Ай – притока Уфы. ООО “Уралтитан-93” с участием АО “Гиредмет” госкорпорации “Росатом” и ИМЕТ УрО РАН предложены технологии добычи, обогащения и металлургической переработки песков с получением высокотитанистого шлака и ванадистого металла. В

частности, предусмотрено строительство карьера и получение ильменитового концентрата на базе мобильного обогатительного комплекса. Концентрат может быть товарной продукцией, но целесообразнее его перерабатывать на высокотитанистый шлак, например, на Златоустовском металлургическом заводе в рудотермических электропечах или Березниковском металлургическом комбинате, где плавится импортный концентрат.

Один из вариантов развития титановой отрасли предусматривает создания металлургического производства на базе энергетических мощностей Кольской АЭС (рис. 4). Реализация совместной плавки лейкоксенового и перовскит-титаномагнетитового концентратов позволит:

- 1) снизить радиоактивность концентрата до безопасного уровня;
- 2) использовать отечественное сырьё;
- 3) создать металлургический кластер с получением продукции глубокой степени переработки, в том числе проката нержавеющей стали, пигментного диоксида титана, изделий из титана, оксидов и солей редких металлов;
- 4) снизить риски сырьевой импортозависимости;
- 5) снизить на 7.5% себестоимость пигментного диоксида титана в связи с отсутствием в лейкоксеновых концентратах железа и соответствующим уменьшением расхода серной кислоты на вскрытие.

Ниобий. Ниобий в виде феррониобия (содержит 50–65% Nb) применяется для производства жаропрочных сталей в авиации, нержавеющей сталей в машиностроении, судостроении, трубной промышленности (на эти цели идёт около 85% мирового потребления, 93% российского). Применение ниобия в низколегированных сталях повышает их прочность на 20%, использование таких сталей для газопровод-

Таблица 3. Содержание ниобия в сталях разных марок

Вид стали	Марка	Содержание Nb, %
Трубы большого диаметра	X 80	0.05
Стали для судостроения	EN 36 normalized	0.03
Конструкционные стали	S 355 MC	0.03
Автомобильные полосы	S 500 MC	0.04
Автомобильный лист	H 340 LA	0.04
Жаростойкие стали	1.4509	0.60

ных труб большого диаметра в 1.5 раза увеличивает их производительность, значительно снижает расходы при эксплуатации. Содержание ниобия в сталях представлено в таблице 3.

Единственный отечественный источник сырья — пентаоксид ниобия Соликамского магниевого завода (617 т в 2020 г.), получаемый из лопаритового концентрата Ловозёрского горно-обогатительного комбината, выпускается в недостаточном количестве [22–26]. Пентаоксид ниобия высокого качества используется в производстве металлического ниобия и ниобиевых лигатур для спецсплавов. По нашей оценке, объём выпуска металлического ниобия составляет от 30 до 50 т в год, а ниобиевых лигатур (NiNb, NbAl, NbCr, NbWMoZr) — около 390 т в год в пересчёте на чистый ниобий. С 1997 г. потребление ниобия в чёрной металлургии России возросло почти в 40 раз [27]. В 2021 г. импортировано 2120 т этого металла в виде феррониобия, отечественная чёрная металлургия практически полностью зависит от его поставок из-за рубежа (в среднем 99% объёма потребления).

Возможности наращивания объёма действующего производства пентаоксида ниобия на Соликамском магниевом заводе ограничены. Мощности по переработке лопаритового концентрата составляют до 13 тыс. т в год, с производством соединений ниобия — до 855 т в пересчёте на пентаоксид ниобия (Nb_2O_5). Проблемы на действующей шахте Карнасурт связаны с истощением запасов богатой руды. Вторая шахта Умбозеро затоплена, необходимо восстановление инфраструктуры.

АО «Атомредметзолото» (горнорудный дивизион госкорпорации «Росатом») в 2020 г. был разработан проект модернизации и наращивания мощностей Ловозёрского ГОКа. В результате его реализации планируется довести переработку лопаритового концентрата до 24 тыс. т в год, объёмы производства пентаоксида ниобия до 1700 т.

В настоящее время проводятся геолого-разведочные работы перовскит-редкометалльного месторождения Африканда. По проекту АО «Арк-

минерал-Ресурс» проект планируется реализовать в два этапа: первый — создание горно-обогатительного комбината, второй — химико-металлургического комплекса. Мощность предполагаемого производства по оксидам ниобия и тантала составит 1030 т. Планируемый ввод в эксплуатацию — 2025 г.

Татарское месторождение разрабатывалось в 2002–2013 гг. ОАО «Стальмаг» с получением из фосфат-ниобиевой руды чернового концентрата. На Вишнёвогорской обогатительной фабрике из него производили пироксидный концентрат, из которого выплавляли феррониобий для нужд компании «Северсталь». Годовая производительность — 168 т Nb в феррониобии. Вскоре богатая руда была исчерпана, возникла необходимость финансирования проекта с совершенствованием технологии обогащения. В 2010 г. компания «Северсталь» приняла решение приостановить производство на «Стальмаг». В настоящее время ООО «Русская ниобиевая компания» планирует возобновить работы на месторождении. Учитывая, что Татарское месторождение относится к мелким, не следует ожидать, что его разработка позволит удовлетворить существенную часть спроса отечественной металлургической промышленности.

Уникальна по запасам и содержанию ниобия руда Томторского месторождения в Якутии. В 2014 г. лицензию на разведку и добычу полезных ископаемых (участок Буранный) получила компания ООО «Восток Инжиниринг», в настоящее время готовится промышленное освоение месторождения. Участки Северный и Южный находятся в нераспределённом фонде. Освоение Томторского редкометалльного месторождения планируется реализовать в следующие расчётные сроки: 2027 г. (ранее 2024 г.) — проектирование и строительство, ввод в эксплуатацию; 2028 г. (ранее 2026 г.) — выход на проектную мощность 10 тыс. т феррониобия в год.

Лицензией на разведку и добычу редких металлов и попутных компонентов Зашихинского месторождения до 2025 г. обладает ЗАО «Техно-

инвест Альянс”. Партнёром и акционером компании выступает ПАО “Челябинский трубопрокатный завод” — один из крупнейших отечественных производителей трубной продукции (общая доля рынка около 20%). Планируемый годовой объём производства пентаоксида ниобия: 2099 т (99.8%) Nb_2O_5 ; 109 т (99.99%) Nb_2O_5 . Строительство ГМК на базе Зашихинского редкометалльного месторождения в Иркутской области планируется реализовать в следующие расчётные сроки: 2024 г. (ранее 2023 г.) — строительство ГОКа, объектов инфраструктуры и химико-металлургического завода в городе Краснокаменске; 2025 г. (ранее 2024 г.) — ввод в эксплуатацию и выход на проектную мощность по выпуску оксида тантала, оксида ниобия, феррониобия, цирконового концентрата, концентрата оксидов редкоземельных металлов.

Таким образом, существующие максимальные мощности производства пентаоксида ниобия не могут удовлетворить потребности в сырье для производства феррониобия. К тому же производимый по хлорной технологии оксид имеет высокую себестоимость, поэтому применяется для получения более дорогостоящих изделий (ниобий металлический, лигатуры и т.д.). Реализация планируемого расширения действующего производства на рудах Ловозёрского месторождения, в том числе организация производства переработки концентрата на Чепецком заводе, также не позволят достичь этой цели. Из наиболее проработанных проектов — организация переработки руды Томторского месторождения. Такая мера способна покрыть внутренние потребности отечественной металлургии в феррониобии.

Вольфрам. Вольфрам используется в качестве легирующей добавки в твёрдых и жаропрочных сталях, кислотоупорных и специальных сплавах, в электротехнике, химической промышленности. Из сплавов вольфрама изготавливают детали для машино- и авиастроения, он является обязательной составляющей инструментальной стали. Доля вольфрама, потребляемого в чёрной металлургии, составляет 65% общероссийского объёма потребления.

На российском рынке наблюдается отсутствие эффективной кооперации переработчиков вольфрамового сырья и производителей товарных продуктов, вследствие этого объём экспортируемого концентрата почти в 1.5 раза превышает объём импортируемого. Это обусловлено географическим положением добытчиков сырья и его переработчиков. Ожидается, что в ближайшее десятилетие будут исчерпаны запасы месторождений Приморского края, основного региона России по добыче вольфрама. В настоящее время прорабатывается проект возрождения Тырныаузского горно-обогатительного комбината. Плани-

руемая мощность рудника составляет 1.5 млн т в год. В г. Невинномысске предусмотрено строительство гидрометаллургического завода мощностью 5 тыс. т по оксиду вольфрама и 1.5 тыс. т оксида молибдена в год.

Молибден. До 80% вырабатываемого молибдена используется в чёрной металлургии для легирования стали и чугуна, которые применяются в авиационной и автомобильной промышленности для изготовления сильнонагруженных деталей, эксплуатируемых при высоких температурах. Молибден используют в низколегированных конструкционных (до 0.5% Mo), инструментальных (1.0–1.5%), нержавеющей хромоникелевых (2–4%) и быстрорежущих (7.5–8.5% Mo, вместо вольфрама) сталях.

Добычу молибдена в России осуществляет одно предприятие (Сорский ГОК). Ввиду сложного состава руд освоение месторождений напрямую зависит от уровня мировых цен на молибден, а они в последние годы настолько низки, что были законсервированы не только проекты освоения новых месторождений, но и действующий Жирекенский ГОК. В то же время российские предприятия по производству ферромolibдена, не имеющие собственной сырьевой базы, испытывают дефицит сырья и вынуждены ежегодно импортировать 3.0–3.3 тыс. т молибденового концентрата, что составляет 45–55% объёма его потребления.

На внутреннем рынке реализуется менее 20% ферромolibдена. Основная проблема производства молибдена в России связана с его низким потреблением в чёрной металлургии из-за недостаточного развития производства инструментальных, нержавеющей, быстрорежущих, конструкционных сталей.

Ванадий. Основным потребителем — чёрная металлургия, которая использует около 95% всего производимого ванадия [28–30]. Роль его как легирующего элемента в сталях весьма велика — около 50% выпускаемых легированных сталей содержат присадку ванадия [31, 32]. Ванадиевые конструкционные стали широко используют в авто- и авиастроении, железнодорожном транспорте, машиностроении. Инструментальные стали содержат от 0.2 до 2.6% V. Присадка 1% V к быстрорежущим сталям повышает эффективность резания и сверления инструментами примерно в 2 раза. Ванадий используют также для легирования чугуна. В машиностроении применяют чугуны с присадкой 0.10–0.35% V для изготовления паровых цилиндров, поршневых колец и золотников паровых машин, изложниц, прокатных валков, матриц для холодной штамповки.

Объём производства феррованадия в России составляет 3.7 тыс. т в год в пересчёте на ванадий,

видимое потребление — около 3 тыс. т в год. Избыток феррованадия, пентаоксида ванадия и шлака экспортируется. После попытки реконструкции Чусовского металлургического завода последний потерял возможность перерабатывать титаномагнетитовые концентраты — основное сырьё для получения ванадиевого конвертерного шлака. В этой связи актуальна организация переработки других видов сырья на мощностях ферросплавного цеха. Альтернативными источниками ванадия оказываются золы от сжигания тяжёлых фракций нефти, отработанные катализаторы, отвальные шламы и т.д. Важная задача — организация производства очищенного пентаоксида ванадия, применяемого для сплавов титана в химической промышленности. Для получения металлического ванадия и лигатур на его основе актуальна задача получения триоксида ванадия V_2O_3 . В настоящее время указанные оксиды поступают из-за рубежа в объёме от 1 до 3,5 тыс. т в год.

Редкоземельные металлы. При запасах около 20% мировых Россия добывает и перерабатывает всего около 1% своих редкоземельных металлов (РЗМ). Основная часть представлена коллективным концентратом карбонатов РЗМ. Всего 5,6% добываемых редкоземельных металлов разделяют с получением соединений индивидуальных “лёгких” РЗМ, при этом соединения “тяжёлых” РЗМ не производят. До 95% получаемых в России коллективных концентратов РЗМ отправляют за рубеж, где проводят разделение. Ежегодно свыше 1000 т оксидов РЗМ после переработки (разделённых и частично разделённых) и около 100 т в виде металлов и сплавов Россия импортирует.

Ввод новых мощностей по добыче РЗМ не имеет смысла без создания новых отраслей промышленности, ориентированных на их потребление, в том числе в металлургии.

Объём потребления РЗМ в России составляет 1230 т, из них 120 т — в металлургии. Чаще всего эти металлы применяют в производстве высокопрочного чугуна с шаровидной формой графита. Наиболее массовая сталь с РЗМ используется для трубной заготовки, на втором месте — рельсовая. Доля стали с РЗМ не превышает 1% её суммарного объёма.

Практически все исходные материалы с РЗМ для металлургии импортируются (мишметалл, ферросплавы и чистые металлы). Вопрос импортозамещения на отечественном рынке сырьевых материалов с РЗМ для металлургии остаётся нерешённой актуальной задачей [33–35]. Организация многотоннажного производства лигатур с РЗМ электропечным способом должна привести к снижению их стоимости по сравнению с получением модификаторов из мишметалла и чистых

РЗМ. Пока же стоимость продукции с РЗМ отечественных предприятий очень высока.

Несмотря на существенный рост потребления РЗМ в металлургии, объём внутреннего рынка остаётся небольшим. Увеличения потребления РЗМ следует ожидать после решения вопроса импортозамещения и расширения производства высокопрочного чугуна, специальных сталей и сплавов, а также товаров на их основе.

О создании горно-металлургического комплекса в Мурманской области. В Мурманской области сложилась тупиковая ситуация с реализацией электроэнергии. Кольская АЭС производит большое количество электроэнергии, но обеспечивает ею только населённые пункты и АО “Кольская ГМК”. В то же время в регионе есть уникальные месторождения полезных ископаемых, организация переработки которых может гарантировать устойчивый рост потребления электроэнергии в крупных масштабах и производство высоколиквидной продукции, что могло бы обеспечить устойчивое развитие региона. На небольшой площади Кольского полуострова обнаружено 3/4 всех известных химических элементов. Эта территория уникальна по минералогическому и химическому составу, запасам редкометалльного сырья, циркония, тантала и др. На базе ряда месторождений действуют горно-обогачительные предприятия. Дополнительно представляется целесообразным в порядке импортозамещения хромового сырья создать производство феррохрома на базе руд Сопчеозёрского месторождения; предварительная проработка схемы показала положительные результаты.

Запасы титана в виде ильменит-титаномагнетитовых, перовскитовых руд могут служить для производства металлического титана и пигментного диоксида титана. Мурманская область — единственный российский регион, где осуществляется добыча редкоземельных руд. Необходимо принять меры для извлечения Nb, Ta, Rb, Cs и ряда других редких металлов для обеспечения импортонезависимости страны. Результаты исследований работ по большинству схем извлечения этих элементов дают основание считать их перспективными. Реализация этого проекта может позволить избавиться от импортных поставок нержавеющей стали, хромосодержащих концентратов, титанового сырья для производства титановой губки и пигментного диоксида титана; организовать переработку руд месторождений титана, ниобия, РЗМ, загрузить энергоблоки Кольской АЭС.

Россия занимает одно из ведущих мест в минерально-сырьевом комплексе мира, а её мине-

рально-сырьевая база составляет основу национальной безопасности, служит инструментом реализации стратегических государственных интересов [1]. В решении проблемы развития металлургической отрасли для обеспечения технологического суверенитета России значительна роль собственной сырьевой базы твёрдых полезных ископаемых. Её освоение должно полагаться на научные основы комплексного использования отечественного полиметаллического минерального сырья.

Изложенные в статье материалы будут использованы при разработке предложений в программу развития отечественного металлургического производства с целью выполнения положений “Стратегии развития металлургической промышленности РФ на период до 2030 года”, утверждённой распоряжением Правительства РФ от 28.12.2022. № 4260-р [36].

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Раздел “Ванадий” выполнен при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект 22-23-00748.

ЛИТЕРАТУРА

1. Государственный доклад “О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации”. М.: ВНИГНИ, Гидроспецгеология, 2022.
2. Леонтьев Л.И., Волков А.И. Состояние и развитие минерально-сырьевой базы и продукции металлургии для обеспечения импортонезависимости России // Сб. тр. конф. “Физико-химические основы металлургических процессов” имени академика А.М. Самарина. Выкса, 2022. С. 18–36.
3. Жучков В.И., Смирнов Л.А., Зайко В.П., Воронов Ю.И. Технология марганцевых ферросплавов. Ч. 1. Высокоуглеродистый ферромарганец. Екатеринбург: УрО РАН, 2007.
4. Серёгин А.Н. Разработка комплекса технологических решений, обеспечивающих импортозамещение марганцевой продукции. Ч. 1. Анализ рынка марганца и проблемы обеспечения России марганцевой продукцией // Проблемы чёрной металлургии и материаловедения. 2015. № 3. С. 15–28.
5. Жуков Д.Ю., Серёгин А.Н. Перспективы производства металлического марганца из бедных руд в России // Проблемы чёрной металлургии и материаловедения. 2014. № 1. С. 37–42.
6. Серёгин А.Н., Верета Р.А. Проблемы импортозамещения марганцевой продукции // Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2017. № 5 (1409). С. 9–14.
7. Жучков В.И., Смирнов Л.А., Зайко В.П., Воронов Ю.И. Технология марганцевых ферросплавов. Ч. 2. Низкоуглеродистые сплавы. Екатеринбург: УрО РАН, 2008.
8. Kivinen V., Krogerus H., Daavittila J. Upgrading of Mn/Fe ratio of low-grade manganese ore for ferromanganese production // Infacon XII: International Ferroalloys Congress “Sustainable Future”. Finland, Helsinki, 2010. P. 467–476.
9. Gasik M.I., Gladkikh V.A., Zhdanov A.V. et al. Calculation of the Value of Manganese Ore Raw Materials // Russian Metallurgy (Metally). 2009. № 8. P. 756–758.
10. Zhuchkov V.I., Leont'ev L.I., Zayakin O.V. Ferroalloy Production Using Russian Crude Ore // Steel in Translation. 2020. V. 50. № 4. P. 223–228.
11. Кологривов К.А., Серёгин А.Н. Разработка технологии выплавки феррохрома из хромитовых руд Ага-нозёрского месторождения // Проблемы чёрной металлургии и материаловедения. 2016. № 4. С. 41–47.
12. Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Leont'ev L.I. et al. Main Trends in the Processing of Poor Chrome Ore Raw Materials // Russian Metallurgy (Metally). 2008. № 8. P. 709–712.
13. Чернобровин В.П., Михайлов Г.Г., Хан А.В., Строганов А.И. Состояние и перспективы производства хромовых сплавов в условиях Челябинского электрометаллургического комбината. Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1997.
14. Чернобровин В.П., Папкеев И.Ю., Михайлов Г.Г. и др. Теоретические основы процессов производства углеродистого феррохрома из уральских руд. Челябинск: ЮУрГУ, 2004.
15. Папкеев А.И., Папкеев И.Ю., Михайлов Г.Г. К вопросу о комплексной переработке хромовых руд массива Рай-Из // Вестник ЮУрГУ. Серия “Металлургия”. 2010. № 13. С. 24–31.
16. Esenzhulov A.B., Ostrovskii Ya.I., Afanas'ev V.I. et al. Russian Chromium Ore in Smelting High-Carbon Ferrochrome at OAO SZF // Steel in Translation. 2008. V. 38. № 4. P. 315–317.
17. Садыхов Г.Б. Фундаментальные проблемы и перспективы использования титанового сырья в России // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. 2020. № 3–4. С. 178–194.
18. Тигунов Л.П., Быховский Л.З., Зубков Л.Б. Титановые руды России: состояние и перспективы освоения. М.: ВИМС, 2005.
19. Кобелев В.А., Рымкевич Д.А., Степанов Е.А., Зуев А.Г. Двухстадийная технология производства титанового шлака из ильменитовых концентратов // Чёрная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2019. № 12. С. 1352–1359.
20. Корзун В.К., Зубков Л.Б., Чистов Л.Б. Современное состояние сырьевой базы титана и циркония России и эффективные пути промышленного освоения российских месторождений // Сб. тр. “Гиредмет – 70 лет на службе в металлургии редких металлов и полупроводников”. М.: ЦИНАО, 2001. С. 41–51.
21. Vorobkalo N.R., Makhambetov E.N., Baisanov A.S. et al. Study of possibility of manufacture of the complex titanium-containing ferroalloy via single-stage carbother-

- mal method // CIS Iron and Steel Review. 2022. V. 24. P. 17–23.
22. Нечаев А.В., Поляков Е.Г., Белоусов Е.Б. и др. Минерально-сырьевая база ниобия России: приоритеты освоения // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2020. № 4–5. С. 8–15.
23. Никишина Е.Е., Дробот Д.В., Лебедева Е.Н. Ниобий и тантал: состояние мирового рынка, области применения, сырьевые источники. Ч. 2 // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2014. № 1. С. 29–41.
24. Лисов В.И. Редкие металлы России: ресурс технологических инноваций. М.: ЦентЛитНефтегаз, 2018.
25. Мелентьев Г.Б. Перспективы обеспечения собственным редкометалльным сырьём и развития производств феррониобия в России // Тр. научно-практич. конф. “Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершённых фундаментальных исследований и НИОКР: ферросплавы”. Екатеринбург: Альфа-Принт, 2018. С. 36–46.
26. Стулов П.Е., Серёгин А.Н., Пикалова В.С. Разработка технологии выплавки феррониобия и ниобий-содержащих сплавов из концентратов руд Большетажинского месторождения // Проблемы чёрной металлургии и материаловедения. 2012. № 4. С. 5–11.
27. Leont'ev L.I., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V. et al. Potential for obtaining and applying complex niobium ferroalloys // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2022. V. 65. № 1. С. 10–20.
28. Smirnov L.A., Zhuchkov V.I., Zayakin O.V., Mikhailova L.Yu. Complex Vanadium-Containing Ferroalloys // Metallurgist. 2021. № 64. P. 1249–1255.
29. Обзор рынка ванадия и ванадийсодержащей продукции в СНГ. https://www.marketing-services.ru/imgs/goods/800/gynok_vanadija.pdf 2009 (дата обращения 15.03.2023).
30. Фофанов А.А., Новосёлов А.М., Сухов Л.Л. Производство ванадиевой продукции в ОАО “Ванадий-Тула” // Металлург. 2005. № S-1. С. 47–50.
31. Ванадийсодержащие стали и сплавы. Справочник / Под ред. Л. А. Смирнова. Екатеринбург: УрО РАН, 2003.
32. Серёгин А.Н. О проблеме развития рынка ванадийсодержащих сталей // Проблемы чёрной металлургии и материаловедения. 2010. № 2. С. 92–100.
33. Волков А.И., Стулов П.Е., Леонтьев Л.И., Углов В.А. Анализ использования редкоземельных металлов в чёрной металлургии России и мира // Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия. 2020. Т. 63. № 6. С. 405–418.
34. Волков А.И. Состояние и перспективы использования редких металлов в чёрной металлургии // Разведка и охрана недр. 2020. № 3. С. 11–18.
35. Стратегии развития промышленности редких и редкоземельных металлов в Российской Федерации на период до 2035 года // М.: Минпромторг России, 2019. https://minpromtorg.gov.ru/docs/#!strategiya_razvitiya_otrasli_redkih_i_redkozemelnyh_metallov_rossiyskoy_federacii_na_period_do_2035_goda (дата обращения 20.03.2023).
36. Распоряжение Правительства РФ от 28.12.2022 N 4260-р “О Стратегии развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2030 года”. https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_436470/ (дата обращения 15.03.2023).