

УЧЕТ ОСОБЕННОСТЕЙ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ И МОНИТОРИНГЕ ИХ ОБРАЩЕНИЯ В ЭКОНОМИКЕ

Гришаев С.И.

Минпромторг России, г. Москва, Пресненская набережная, 12

Grishaev@minprom.gov.ru,

Русяева Е.Ю.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д.65

rusyaeva@ipu.ru, 1779624@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены особенности редкоземельных металлов, которые необходимо учитывать при их обращении в экономике, планировании и принятии управленческих решений. Отмечен дисбаланс между сырьевой базой и спросом на отдельные редкоземельные металлы современными отраслями промышленности. При анализе дисбаланса возможно использование методов линейного программирования.

Ключевые слова: редкоземельные металлы; производство; разделение; потребление; спрос; дисбаланс

Введение

В настоящее время использование редкоземельных металлов (РЗМ) определяет научно-технический потенциал той или иной отрасли промышленности и стран в целом. Незначительные добавки РЗМ в продукты качественно улучшают их свойства, и в этом смысле РЗМ являются «витаминами промышленности». Так что развитие отрасли РЗМ является приоритетным направлением инновационных исследований [1] для отечественного производства, поскольку велика востребованность этой продукции для становления цифровой экономики.

Как яркий пример использования РЗМ для инновационных решений можно привести смартфон. В смартфонах применяют практически все РЗМ, но в основном восемь из них. В мобильных устройствах эти металлы отвечают за яркость экрана (тербий и диспрозий), ударопрочность, отклик тачскрина (сенсорного экрана) и вибрацию (неодим, диспрозий, европий, тербий). РЗМ также присутствуют в микросхемах (лантан, празеодим, неодим, гадолиний, диспрозий) и динамиках, применяются для полировки стекол (лантан, церий, празеодим). И это только небольшая сфера их применения.

Используются РЗМ обычно в незначительных количествах, но при объеме производства электронных мобильных и других устройств в миллиардах экземпляров, где эти металлы применяют как добавки, объем потребления и, соответственно, производства РЗМ в мире превышает 200 тыс. тонн. Промышленность редкоземельных металлов можно охарактеризовать межотраслевым взаимодействием составляющих ее элементов (начиная от добычи и заканчивая потребляемыми РЗМ отраслями), распределенных на значительной территории (источники сырья, потребители) и требующих для развития существенных затрат ресурсов и времени. Поэтому, по нашему мнению, отрасль РЗМ можно отнести к крупномасштабным системам в соответствии с определением, указанным в [2].

РЗМ имеют свои особенности, которые необходимо учитывать при их обращении в экономике, планировании, мониторинге и принятии управленческих решений. По сути, сейчас создается методика определения всех стадий жизненного цикла проекта РЗМ от концептуального уровня научных исследований в данной области до реальных прикладных результатов [3], то есть, разработок цифровых технологий и инновационных изделий с использованием добавок РЗМ.

Итак, известно, что среднее содержание в земной коре РЗМ (в сумме) составляет $112 \cdot 10^{-4} \%$. РЗМ довольно широко распространены в земной коре. При этом они редко образуют собственные месторождения и чаще всего встречаются в небольших концентрациях в качестве попутных компонентов в составе комплексных руд. Несмотря на значительные в целом мировые ресурсы РЗМ, соотношение между ними в группе лантаноидов крайне неравномерно и неоднородно от месторождения к месторождению. В большинстве промышленных месторождений в мире преобладают начальные члены редкоземельного ряда, называемые легкими РЗМ (или РЗМ цериевой группы) в отличие от тяжелых или иттриевых. В минеральном сырье РЗМ никогда не встречаются поодиночке. Благодаря высокому сродству к кислороду, спектр природных соединений РЗМ включает в основном оксиды, карбонаты, фосфаты и силикаты.

Известно около 300 минералов, содержащих РЗЭ, и только 20 из них имеют промышленное значение. 95% мировых запасов РЗМ представлены в виде бастнезита, монацита, ксенотима, ионно-

адсорбионных глин. Минералы, содержащие РЗМ, можно разделить на две большие группы: минералы, в которых РЗМ являются основным или одним из основных компонентов (монацит, ксенотим и др.) и минералы, в которых РЗМ играют подчиненную роль, частично замещая основные компоненты. Многие из них также содержат и другие ценные металлы, такие как титан, тантал и ниобий, имеющие важное промышленное значение. Этот фактор играет существенную роль на волатильном современном рынке минерального сырья, когда цена соединений РЗМ изменялась несколько раз, как в сторону снижения, так и в сторону увеличения.

Редкоземельные минералы в большинстве своем имеют сравнительно большую плотность (4-9 г/см³), чаще всего они слабомагнитны, с очень низкой электропроводностью. Поэтому основными методами обогащения руд РЗМ являются гравитация, электромагнитная сепарация, а также флотация. Но, например, руды Томторского месторождения могут перерабатываться только гидро- или пирохимическими методами [4].

Согласно данным Геологической службы США (USGS), в структуре мировых разведанных и прогнозных запасов РЗМ лидирующее положение занимает Китай (40-45% мировых запасов). Огромные запасы РЗМ имеют страны СНГ, включая РФ, и США. Заметно им уступают Австралия и Индия.

Характерная особенность руд, содержащих РЗМ, – их радиоактивность, что требует наличия особых компетенций в организации их переработки, а также обращения с образующимися радиоактивными отходами.

Потенциальными источниками редких земель являются техногенные образования. РЗМ, часто в концентрациях, превышающих их концентрации в исходном сырье, содержатся в отходах действующих производств. Например, при переработке апатитового концентрата сернокислотными методами образуется содержащий РЗМ фосфогипс. Общее его количество на предприятиях по производству фосфорных удобрений в России в настоящее время превышает 250 млн тонн. В фосфогипс переходит большая часть содержащихся в апатите РЗМ. В зависимости от схемы сернокислотной переработки апатитового концентрата на одну тонну его в процессе образуется более 1,5 тонны фосфогипса, содержащего более 0,4 % РЗМ, причем доля иттриевой группы в них значительно превышает этот показатель в единственном используемом в России источнике РЗМ – лопарите. За 80 лет эксплуатации хибинских месторождений было получено 620 млн тонн апатитового концентрата, из которого не извлечено не менее 6 млн тонн РЗМ.

Поэлементный состав различных источников сырья представлен в таблице 1.

Таблица 4. Поэлементный состав источников редкоземельных металлов

	Китай		Россия			
	Вауан Обо	Xunwu	Ловозерское месторождение	Томтор	Хибинская группа	Фосфогипс
Оксид лантана	27	29,84	28,0	23,31	22,4	20,5
Оксид церия	50	7,18	57,5	42,68	50,2	45,9
Оксид празеодима	5	7,41	3,8	4,14	3,5	5,1
Оксид неодима	15	30,18	8,8	16,72	13,9	17,0
Оксид самария	1,1	6,32	0,96	2,46	1,9	2,34
Оксид европия	0,2	0,51	0,13	0,79	0,4	0,62
Оксид гадолиния	0,4	4,21	0,21	1,67	1,3	1,77
Оксид тербия	-	0,46	0,07	-	0,2	0,07
Оксид диспрозия	-	1,77	0,03	0,83	0,5	0,94
Оксид гольмия	-	0,27	0,03	0,15	-	0,14
Оксид эрбия	2	0,88	0,07	0,57	0,2	0,27
Оксид иттрия	0,3	10,07	-	6,38	5,5	3,5
Оксид иттербия	-	0,62	0,29	0,24	-	0,1
Оксид лютеция	-	0,13	0,05	-	-	-
Оксид тулия	-	0,27	-	0,06	-	-

Все источники РЗМ являются комплексными, содержащими широкий спектр сопутствующих компонентов разной степени ценности и востребованности. Себестоимость РЗМ практически из всех источников без реализации основной части попутной продукции являются неконкурентоспособными на рынке.

РЗМ в том или ином соотношении всегда встречаются вместе во всех сырьевых источниках, но практически никогда не потребляются в виде природной смеси. В настоящее время именно звенья

технологической цепочки, связанные с разделением лантаноидов, определяют конкурентные преимущества производителей этой продукции.

Основным при разделении РЗМ уже много лет является метод жидкостной экстракции. Современный завод по производству РЗМ, выпускающий несколько отдельных редкоземельных продуктов, содержит сотни ступеней экстракционных аппаратов, чаще всего типа смеситель-отстойник. Организацию процесса разделения РЗМ, как и сырьевые источники, рассматривают комплексно, основываясь не только на технологической целесообразности. Учитывают экономический, экологический, социальный факторы, стараются вписать процесс в общезаводскую схему производства с ее материальными потоками.

Выбор той или иной конструкции экстракционного аппарата определяется в первую очередь конкретными условиями ее использования, а также технико-экономической целесообразностью.

Современные технологические процессы разделения РЗМ экстракцией являются непрерывными и многостадийными. В целом в экстракционном переделе количество ступеней экстракции может достигать 1000-1500, что определяется ассортиментом товарной продукции. Для разделения пары соседних элементов, как правило, необходимо использовать несколько десятков ступеней экстракции и отмывки органической фазы, в зависимости от коэффициентов. Важной технологической задачей является управление процессами разделения и поддержания устойчивой работы экстракционных каскадов.

Как правило, практически все мировые производители придерживаются близких подходов к разделению: на первом этапе делят на две или три, иногда на четыре группы; далее отделяют иттрий; селективно извлекают церий и европий за счет перевода их в отличные от трех степени окисления; последняя стадия – тонкое разделение с получением индивидуальных соединений РЗМ. Необходимые экстракционные системы выбирают с учетом стоимости расходных реагентов и технических требований к конечной продукции. [5]

Одна из схем разделения группового концентрата РЗМ при переработке бастнезитового концентрата на китайском предприятии представлена на рис. 1.

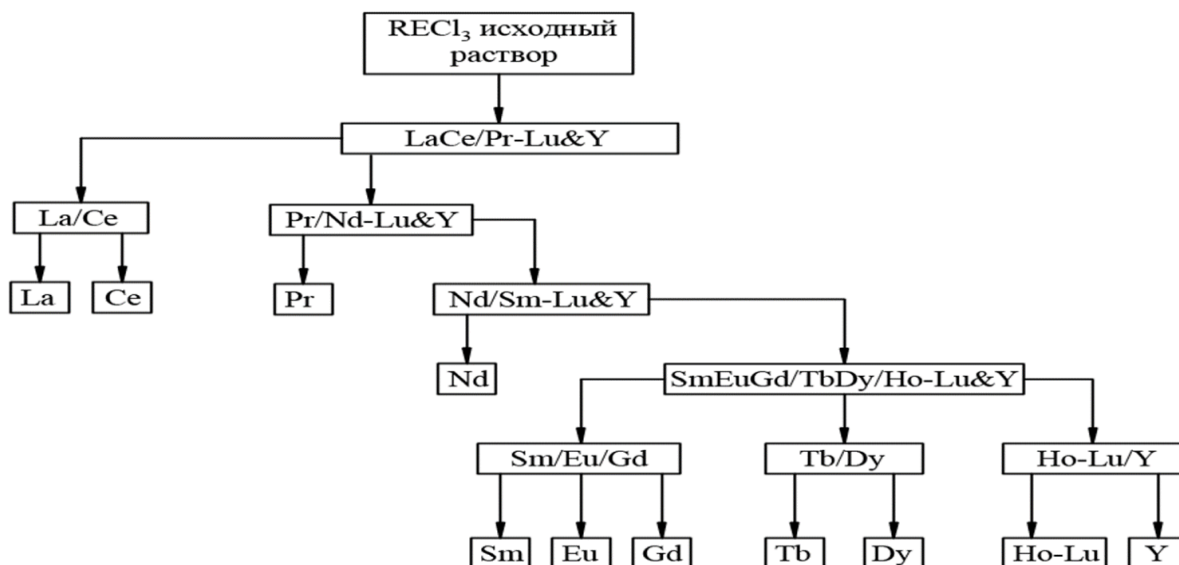


Рис. 1. Схема разделения группового концентрата при переработке бастнезитового концентрата

Болезненным вопросом для существующей в настоящее время редкоземельной промышленности является ее активный вклад в загрязнение окружающей среды. Опыт Китая, где расположено основное производство редкоземельной продукции в мире, показывает, что оно сопровождается истощением ископаемого топлива для удовлетворения потребности в энергии и вкладом в глобальное потепление. Устаревшие технологии при добыче, обогащении, разделении и выплавке РЗМ серьезно повредили растительность, вызвали загрязнение поверхностных и подземных вод, эрозию и подкисление почв, уменьшили производство сельскохозяйственных культур. Кучное выщелачивание при переработке ионно-абсорбционных глин приводит к образованию 2000 тонн хвостов при производстве 1 тонны РЗМ. Получивший широкое распространение метод выщелачивания на месте связан с образованием большого количества аммонийного азота, тяжелых металлов и других

загрязняющих веществ. Образуется большое количество радиоактивных остатков. В некоторых регионах чрезмерная добыча РЗМ привела к оползням, загрязненным рекам, чрезвычайным ситуациям и даже к крупным авариям и катастрофам, нанеся огромный ущерб безопасности и здоровью людей. Восстановление и улучшение окружающей среды ложится обременением на некоторые регионы добычи РЗМ [6].

Экологические проблемы, связанные с эксплуатацией редкоземельных месторождений и переработкой добытого сырья, побудили руководство Китая к принятию новых природоохранных правил. Но эти проблемы не являются специфичными только для Китая. Известны сложности, возникавшие у компании Моликорп в период эксплуатации рудника Маунтин Пасс.

Сфера применения и потребления РЗМ в настоящее время огромна и продолжает расширяться. Вялый интерес к РЗМ в середине прошлого века сменился во второй его половине стремительным ростом их производства с темпом 10% в год в связи с появлением и развитием новых отраслей техники. За последние 25 лет мировой рынок РЗМ вырос почти в 3,5 раза. В настоящее время рынок РЗМ растет, но уже более низкими темпами.

Редкоземельная отрасль напрямую зависит от развития многочисленных сфер потребления, связанных с наличием большого ряда РЗМ в сырье и их индивидуального использования.

Еще в 1970-х годах на рынке преобладал спрос на неразделенные материалы. Интерес к индивидуальным редким землям начал расти в 1980-е годы и продолжается до настоящего времени (в основном, в результате появления новых сфер потребления). Но при этом появилась и в настоящее время усиливается разбалансированность рынка РЗМ [7].

Наиболее востребованными сейчас являются неодим, празеодим, тербий и диспрозий за счет их использования в постоянных магнитах, потребность в которых, по прогнозу, и дальше будет расти вследствие развития ветроэнергетики, расширения производства гибридных электромобилей и многих других высокотехнологичных отраслей. Но при этом производство празеодима и неодима в количествах, достаточных для удовлетворения спроса, вызовет формирование избыточных поставок церия и лантана.

Аналогичная ситуация наблюдалась, когда в результате повышения добычи ионно-адсорбционных руд с целью извлечения диспрозия и тербия возник избыток поставок иттрия, особенно заметный в условиях спада на рынке люминофоров для электроннолучевых трубок цветного изображения.

Для эффективного производства редкоземельной продукции в России необходим развитый рынок их потребления, наличие развитых отраслей, их потребляющих. При этом следует отметить, что стоимость конечных изделий с добавками РЗМ на порядок-два выше стоимости самих РЗМ.

В настоящее время потребление РЗМ в виде разделенных оксидов и металлов в России незначительно, но при этом значительное их количество импортируется в составе конечных изделий в виде добавок. Потребляемый объем РЗМ меньше уровня безубыточности добывающих и перерабатывающих производств. Избытки РЗМ необходимо отправлять на экспорт. Возникает вопрос – куда и в какой форме?

Для производства лантана для катализаторов необходимо организовать выпуск катализаторов в самой России и при этом вступить в конкуренцию с иностранными поставщиками (например, BASF). Безубыточное производство предполагает выпуск значительно больше внутренних потребностей, и, следовательно, необходим выход на зарубежные рынки. Ждут ли нас там?

Аналогичная ситуация со сбытом церия. Одно из основных направлений использования церия – раскислитель при выплавке высококачественных сталей [8]. Церий можно продать как японским сталеплавильным предприятиям (при этом цена и качество должны быть конкурентоспособными по сравнению с китайскими), так и российским (но при этом теперь уже сталь должна быть конкурентоспособной на мировом рынке). При этом японские стали идут в дальнейшее производство, например, автомобилей.

Еще один пример – выпуск редкоземельных магнитов Nd-Fe-B для ветрогенераторов. Требование по локализации производства магнитов в РФ – логичное, но недостаточное. Требуется еще и выделение инвестиций на строительство ветропарков (в объемах, на порядки превышающих стоимость РЗМ для магнитов). Самый болезненный вопрос – утверждение тарифов на закупку электричества у ветропарков по цене,кратно превышающей цену традиционной генерации (мазут/уголь/газ).

Как видно, РЗМ – достаточно сложный товар в плане сбыта. Продажа в форме коллективного концентрата упирается в фактическую монополию Китая по разделительным мощностям, а продажа в форме разделенных индивидуальных металлов требует сбыта порядка 4-15 продуктов

(в зависимости от глубины разделения на индивидуальные металлы), и по каждому продукту – свои рынки сбыта, со своими покупателями и правилами игры.

По этой причине в большинстве коммерчески успешных РЗМ-производств основу экономики составляют не РЗМ, а ликвидные попутные РМ и другие продукты. Так, в товарной линейке Соликамского магниевого завода доля редкометалльного производства в выручке составляет 50% (остальные 50% - магний и попутные продукты), в том числе РЗМ - 15%, титан - 15%, тантал и ниобий - 20%). Как следствие, сырьевые источники с полезным продуктом в виде одних лишь РЗМ (такие, как монацит), практически не имеют коммерческих перспектив.

Отметим, что из всех РЗМ на сегодняшний день около 80% выручки дают три металла (неодим, празеодим, диспрозий). Эти металлы составляют основу высокоэнергетических магнитов. И именно эти магниты имеют перспективы существенного роста вследствие активного развития рынка электромобилей. При этом их долю затрат в затратах на полное извлечение РЗМ можно оценить на уровне 20%. Таким образом, можно говорить о соблюдении «правила Парето».

Вопрос, требующий особого внимания – дисбаланс спроса и потребления РЗМ в разрезе отдельных металлов. В большинстве сырьевых источников преобладают РЗМ легкой группы (лантан, церий, неодим, празеодим), а доля остальных РЗМ среднетяжелой группы ~2-8%. Это значит, что для производства достаточных объемов дефицитных тяжелых РЗМ требуется перепроизводство и сбыт по бросовой цене легких РЗМ. Именно эта причина повлекла за собой падение цен на лантан и церий до уровня ниже 2 \$/кг. Из наиболее очевидных дефицитных материалов – диспрозий. Его содержание в магнитах Nd-Fe-B 1-4%, но с добавками диспрозия магниты выдерживают температуру до 250°C, а без него – лишь 60°C. Рассчитывать же на возможность закупки диспрозия в товарных количествах из Китая не приходится, так как китайские производители не заинтересованы в создании себе конкурентов на рынке магнитов. Для достижения полного баланса потребуется осваивать месторождения тяжелых РЗМ с ключевым дефицитным материалом – диспрозием.

Идеальной является ситуация, когда поэлементной структуре потребления отвечает состав сырья, из которого извлекаются РЗМ.

Поскольку из природных ресурсов во всем мире в настоящее время извлекается коллективный концентрат преимущественно легких РЗМ, а объемы и темпы роста потребления отдельных лантаноидов существенно разнятся, смещаясь в сторону среднетяжелых, возникновение и нарастание дисбаланса производства/потребления неизбежно. Нарастивая производство остро необходимых металлов, компании-производители наводняют рынок и без того избыточным церием, сбивая цену и снижая прибыльность бизнеса в целом. Так, например, выход на рынок 1 тонны оксида европия из бастнезита сопровождается попутным производством других редких земель: лантана – 300 тонн, церия – 450 тонн, празеодима – 38 тонн, неодима – 118 тонн, самария – 7,3 тонны, гадолиния – 1,4 тонны, иттрия – 0,7 тонны. При этом избыток некоторых РЗМ средней и тяжелой групп в силу несопоставимо меньшего объема производства не оказывает заметного влияния на рынок, однако необходимость их отделения в процессе получения востребованных промышленностью РЗМ усложняет и удорожает технологический процесс.

Нарастанию дисбаланса во многом способствуют ограничения, связанные с выполнением международных соглашений по климату. Так, чтобы поддерживать концентрацию CO₂ в атмосфере на уровне 450 ppm, необходимо развивать возобновляемые источники энергии (ветровые, солнечные и т.д.). Для соответствующего развития производства ветрогенераторов и электродвигателей необходимо нарастить производство диспрозия в течение 25 лет на 2600%. Рост потребления диспрозия вызовет огромный избыток многих других РЗМ.

Поскольку при наличии дисбаланса возможности открытия крупных, сбалансированных по составу РЗМ месторождений неопределенны и достаточно сомнительны, в настоящее время рассматриваются возможные способы выхода из сложившейся ситуации. Среди них можно отметить следующие подходы:

- усреднение состава концентрата смешиванием сырья из различных месторождений для приближения его к текущей структуре потребления и унификации дальнейшей переработки;
- диверсификация ресурсов РЗМ с вовлечением в переработку не только новых месторождений, но и техногенных отходов;
- рециклинг, особенностью которого является возвращение в производственную цепочку только востребованных РЗМ;
- замещение РЗМ (заметим, что попытки отказаться от них или заменить на более дешевые и доступные металлы не принесли пока успеха. Во многом это связано с уникальной электронной структурой и уникальными свойствами 4f электронных орбиталей);

- уменьшение потребления на основе новых инженерных решений;
- создание новых областей крупнотоннажного потребления избыточных РЗМ.

Существенные различия в степени критичности отдельных лантаноидов для наиболее важных отраслей промышленного производства и безопасности государства объясняет интерес к методам, позволяющим селективно извлекать отдельные РЗМ из растворов выщелачивания природного или техногенного сырья. Наиболее заинтересованы в развитии этого подхода производители иттриевых земель, стремящиеся уйти от неизбежно громоздких экстракционных схем с применением нескольких экстрагентов. Их не пугает перспектива накопления невостребованной части продукции, поскольку отсутствие необходимости в ее разделении играет на руку экономике, а организация хранения сотен килограммов и даже тонн неразделенных до поры востребованности карбонатов некоторых тяжелых РЗМ не является проблемой.

Движущей силой выхода компаний на рынки, в том числе РЗМ, является прибыль. Для производства РЗМ она будет определяться следующим образом:

$$R = \sum_{n=1}^{15} [P_n \times D_n - C_n \times Q_n], \quad (1)$$

где

R – прибыль; P_n – цена n -го оксида РЗМ; D_n – спрос n -го оксида РЗМ; C_n – себестоимость n -го оксида РЗМ; Q_n – содержание n -го оксида РЗМ в сырье.

При этом существуют ограничения, что спрос на отдельные оксиды РЗМ меньше, чем их содержание в исходном сырье.

В этом случае возможно применение методов линейного программирования и создание математической модели экономической задачи.

Целевая функция будет иметь вид

$$R = \sum_{n=1}^{15} [P_n \times D_n - C_n \times Q_n] \rightarrow \max \quad (2)$$

При этом, кроме нахождения максимума прибыли при существующих ограничениях, может возникнуть необходимость рассмотрения следующих задач:

1) Определение прибыли/убытка при комплексном (полном) извлечении РЗМ в рамках только разделительного процесса или в рамках вертикально интегрированной компании с получением продукции следующих переделов;

2) Определение избытка РЗМ, получаемых при извлечении необходимого элемента;

3) Определение количества дефицитного РЗМ при извлечении других РЗМ, связанного с необходимостью технологического процесса, в соответствии со спросом.

У каждого из потенциальных российских производителей первичной продукции и разделенных РЗМ могут быть собственные представления о необходимом объеме производства с учетом безубыточности. Это, в свою очередь, может повлиять на внутренние цены, создать ненужную конкуренцию при выходе на внешний рынок. В этой ситуации необходима регулирующая роль государства. Влияя на развитие сырьевой и перерабатывающей базы, вкладывая средства и стимулируя развитие нисходящих звеньев высокотехнологичных производств до потребительской продукции, государство может создать устойчивую и эффективную вертикально интегрированную структуру.

В первую очередь с точки зрения интересов стратегической безопасности страны необходимо рассматривать извлечение критических РЗМ. Необходим обоснованный подход к очередности вовлечения в переработку сырьевых источников с учетом не только текущей рыночной ситуации, но и прежде всего замещения импорта в чувствительных для устойчивого существования и развития государства областях потребления РЗМ.

При этом Россия имеет все предпосылки и возможности для вхождения российских компаний в мировой рынок РЗМ на ресурсном и технологическом уровне (второе место в мире по запасам РЗМ и наличие собственных технологий) [9].

При мониторинге мирового и национальных рынков продукции РЗМ целесообразно учитывать то обстоятельство, что появление российской, высокотехнологичной, инновационной продукции на этих рынках должно привести к их трансформации. Как пример, разработанные в России магнитотвердые материалы с РЗМ для навигационных приборов являются конкурентоспособными по сравнению с продукцией китайского производства. Они позволяют повысить точность навигационных систем на 30-50%, получать магниты любых типоразмеров, что обеспечит снижение трудоемкости изготовления узлов приборов на 25-30%, снизить стоимость приборов на 20-30%. Трансформация рынка будет заключаться в формировании иных конкурентных отношений контрагентов, а также

более жесткой фиксацией потребительского качества товарной продукции. Простая замена одного вида товара на другой может стать практически невозможной, и помимо экономических факторов на новом рынке будут более жестко регламентироваться такие показатели, как номенклатура, назначение, технические, эксплуатационные свойства материалов, сервисное обслуживание изделий, экологические характеристик производства и пр. В перспективе все это окажет определенное влияние на изменение рынков РЗМ [10].

Заключение

Развитие РЗМ-промышленности необходимо осуществлять на принципах, отличающихся от реализации стандартных инвестиционных проектов. Вместо вопросов финансово-экономической эффективности проектов необходимо уделить внимание сквозному производственному планированию между всеми участниками отрасли, охватывающему широкий спектр тем: от разработки/трансфера технологий до глобального макроэкономического прогнозирования и формирования международных альянсов. Относительно малый масштаб самих РЗМ-проектов (и, возможно, недостаточная экономическая состоятельность отдельных производств) будет компенсироваться большим кумулятивным эффектом развития производств верхних переделов (потребителей РЗМ-продукции). В современных условиях цифровизации экономики ставка на сквозное производственное планирование будет способствовать, на наш взгляд, в том числе и повышению эффективности реализации процессов коммерциализации инновационных технологий [11] на всех этапах жизненного цикла инноваций [3].

Литература

1. Салтыков С.А., Русяева Е.Ю. Подходы к определению приоритетности в науке и инновациях. 1-е изд. М.: ИПУ РАН, 2018. – 151 с.
2. Цвиркун А.Д. Управление развитием крупномасштабных систем в новых условиях. Проблемы управления. 2003. № 3.
3. Русяева Е.Ю., Салтыков С.А. Схема и методика идентификации стадии жизненного цикла инноваций / Труды 10-й Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2017, Москва), под общей редакцией С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркуна, М.: ИПУ РАН, 2017. С. 404 - 410.
4. Юшина Т.И., Петров И.М., Гришаев С.И., Черный С.А. Обзор рынка РЗМ и технологий переработки редкоземельного сырья. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. № 061 С. 577-608.
5. Поляков Е.Г., Нечаев А.В., Смирнов А.В. Металлургия редкоземельных металлов. Москва. Metallurgizdat. 2018. 732 с.
6. Situation and Policies of China's Rare Earth Industry. Information Office of the State Council the People's Republic of China. June 2012:1-38.
7. Нечаев А.В., Поляков Е.Г. Существующий и перспективный баланс производства и потребления редкоземельных металлов в России. Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2020. № 2. С. 49-53.
8. Волков А.И., Стулов П.И., Леонтьев Л.И., Углов В.А. Анализ использования редкоземельных металлов в черной металлургии России и мира. Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. 2020; 63(6):405-418. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-6-405-418>
9. Богданов С.В., Гришаев С.И. Формирование рынка редкоземельных металлов в условиях глобализации бизнеса / Материалы Пятой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2011. - Москва: ИПУ РАН, 2011. - С. 346-348, под общей редакцией С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркуна.
10. Богданов С.В., Сафронов И.А., Гришаев С.И. Управление конкурентными отношениями на рынке редкоземельной продукции для электронной техники /Труды Седьмой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2013. - Москва: ИПУ РАН, 2020. - С. 195-198.
11. Матковская Я.С. Проблемы коммерциализации инновационных технологий в условиях цифровизации экономики / Труды Тринадцатой Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2020)». – Москва: ИПУ РАН, 2020. – С 437-446. DOI 10.25728/mlsd.2020.0437.