

Редкоземельные элементы в производстве и материаловедении



Петр Витязь,
начальник Управления
аэрокосмической
деятельности аппарата
НАН Беларуси, академик



Валерий Федосюк,
генеральный директор
НПЦ НАН Беларуси по
материаловедению,
член-корреспондент



Казимир Янушкевич,
главный научный
сотрудник лаборатории
физики магнитных
материалов НПЦ
НАН Беларуси по
материаловедению,
доктор физико-
математических наук

Анализ добычи и использования

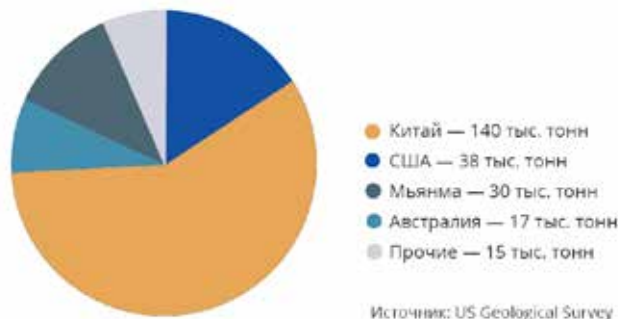
Открытие редкоземельных элементов (РЗЭ) состоялось в 1787 г. в Швеции при разработке пород штолен в небольшом городке Иттербю недалеко от Стокгольма. По химическим и физическим характеристикам обнаруженные новые элементы были мало различимы – изучение их свойств велось в пределах научных лабораторий несколько десятилетий. Первое коммерческое применение РЗЭ – в качестве сеток накаливания ламп газового освещения – было осуществлено через 90 лет после открытия. Вторым направлением стало использование неразде-

ленных сплавов РЗЭ в стеклах осветительных ламп, а с 1911 г. – в качестве добавок в стекло для придания ему разных цветовых оттенков. В 1934 г. компания «Кодак» начала применять их в качестве компонентов для повышения индекса рефракции стекла в оптических устройствах, содержащих линзы.

В результате реализации Манхэттенского проекта в США в период 1942–1943 гг. появились новые способы сепарации изотопов и близких по характеристикам элементов. В основу метода разделения последних, в том числе и РЗЭ, в таблице Д.И. Менделеева легли процессы ионного обмена. К настоящему времени установлено, что к редкоземельным относятся 17 элементов: скандий (с атомным весом 21), иттрий (39) и 15 представителей группы лантаноидов (от 57 до 71). Наиболее часто встречаются в земной коре церий, иттрий, лантан и неодим. РЗЭ нередко называют редкоземельными металлами (РЗМ) и окислами (РЗО), поскольку они традиционно продаются на рынках сбыта в виде окислов по причине минимизации влияния окислительных процессов на изменение свойств при длительном хранении и транспортировке. Эксперимент показал, что все РЗМ обладают высокой химической активностью, способностью к стеклообразованию, намагничиванию в сильных магнитных полях, переходу в состояние сверхпроводимости, флуоресценцией и лазерным эффектом, диэлектрическими свойствами, высокой радиационной стойкостью и удельной электропроводимостью [1].

Объемы добычи

Наличие уникальных свойств обеспечило редкоземельным металлам широкое применение в автомобильной и стекольной промышленности, микроэлектронике, производстве катализаторов для нефтехимических процессов, изготовлении различных составов мишметаллов для металлургии, аккумуляторов и полировальных порошков, присадок для дизельного топлива, каталитических нейтрализаторов выхлопных газов, постоянных магнитов, люминофоров, керамических конденсаторов, при выращивании искусственных кристаллов [2]. РЗМ широко используются в радиопередающих устройствах, мобильных телефонах, телевизорах, перезаряжаемых



Источник: US Geological Survey

Рис. 1. Распределение производства РЗМ по основным странам добычи

батареях. Они являются основными элементами в современных разработках «зеленой» энергетики: генераторах ветряных турбин, гибридных автомобилей. Широко задействованы и в военных технологиях при создании приборов ночного видения, высокоточных вооружений, оборудования GPS [3].

Долевое распределение объемов производства РЗМ в разных странах мира по состоянию на 2020 г. приведено на рис. 1. Диаграмма убедительно демонстрирует лидерство КНР в этой сфере.

Применение РЗМ значительно увеличилось в автомобильной промышленности, в частности при выпуске электро- и гибридных автомобилей. К примеру, в модели Toyota Prius задействовано более десятка килограммов редкоземельных элементов, в основном лантана и неодима (рис. 2). Изготовление мобильных средств связи также требует достаточно много РЗМ (рис. 3).

На рис. 4 представлены тенденции спроса на редкоземельные металлы в период 2010–2025 гг. при производстве постоянных магнитов. Очевиден несомненный рост востребованности РЗМ в последние годы.



Рис. 2. Узлы в автомобиле, содержащие РЗМ

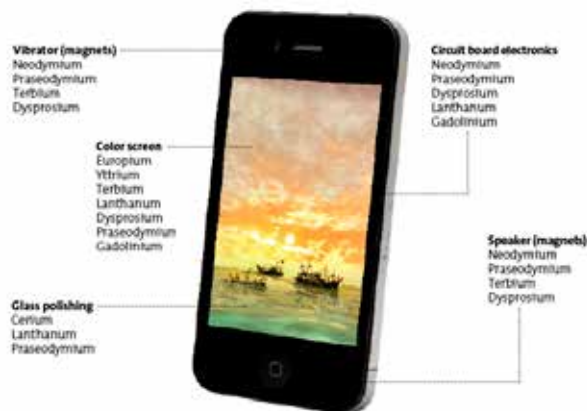


Рис. 3. Основные узлы, содержащие РЗМ при изготовлении мобильных средств связи

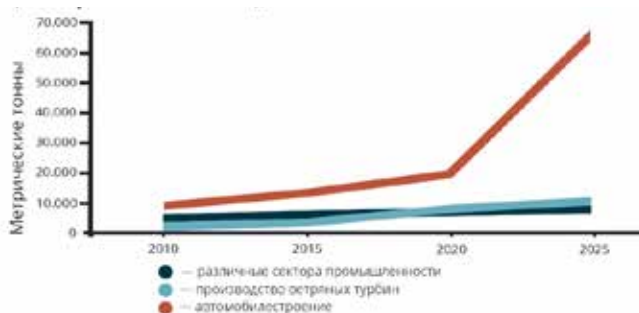


Рис. 4. Динамика объемов совокупного мирового спроса на РЗМ для производства постоянных магнитов (в метрических тоннах) 2010–2025 гг.

Производство редкоземельных металлов

Последовательность цепочки добавленной стоимости в отрасли производства РЗМ начинается с добычи руды: в основном редкоземельные металлы содержатся в минералах монацит и бастнезит. На последний приходится более 80% получаемых в мире РЗЭ. Добыча и переработка монацита значительно сократилась по экологическим соображениям, из-за обнаружения в нем радиоактивного тория и продукта его распада – радия.

На следующем этапе руда измельчается до состояния гравия, а затем песка. В таком виде она подвергается процессу флотации, при котором РЗЭ остаются на поверхности емкостей, а нежелательные минералы оседают на дно. Затем редкоземельные элементы проходят сепарацию с помощью кислоты и сольвентов для получения наиболее чистых форм оксидов, при этом для каждого элемента используется свой собственный подход. Оксиды перерабаты-

ваются в металлы, а затем – в сплавы для конечного потребления. Вся цепочка – от добычи руды до производства оксидов – занимает около 10 дней. Процесс неизбежно сопровождается огромным количеством отходов: 12 тыс. т жидких и 2 тыс. т твердых при получении одной тонны РЗМ. Поскольку во многих странах существуют экологические ограничения, перспективным видится открытие новых рудных месторождений и создание производств РЗМ вдали от густонаселенных районов. В то же время в Китае законодательство по вопросам экологии достаточно мягкое, и отходы часто сбрасываются без предварительной очистки в водоемы и ирригационные системы, что значительно удешевляет стоимость конечного продукта.

Редкоземельная промышленность, зародившаяся в XVIII–XIX вв. в Европе, в XX в. постепенно переместилась в США в связи с эксплуатацией американского месторождения Molycorp Rare Earth и сделанными наиболее значимыми открытиями и нововведениями в технологиях производства РЗМ. В 1960–1970-е гг. коммерциализация РЗЭ стала очень высокой. К концу 1970-х в США были созданы значительные исследовательские мощности в государственных научных лабораториях и промышленности, и уже в начале 1980-х эта страна стала несомненным лидером в мировой редкоземельной промышленности с доминирующими позициями во всей стоимостной производственной цепочке – от добычи сырья и до конечного продукта.

Ситуация резко изменилась в начале нынешнего столетия, когда на первый план в этой сфере вышел Китай – родина крупнейших в мире запасов руд редкоземельных металлов. Теперь он контролирует глобальные поставки РЗМ и промежуточных продуктов из них. Еще до приобретения КНР компании Magnequench и переноса всего производства на свою территорию здесь проводились интенсивные исследования и разработки по тематике РЗМ, над чем трудились несколько институтов и лабораторий. Страна постепенно продвигалась вверх по цепочке добавленной стоимости, особенно в изготовлении постоянных магнитов. К 2005 г. Magnequench стала собственником нескольких важных патентов в этой области, осуществила слияние с канадской AMR и стала известна как NEO Material Technologies. К 2007 г. она развивалась с темпами в 30% в год. При этом 85% обрабатывающих мощностей и 95% персонала находилось на территории Китая (остальные – в Таиланде). Кроме того, большая часть производств функционирует в форме совместных предприятий с китайскими государственными компаниями.

США утратили свои позиции на рынке постоянных магнитов. Если после открытия нового поколения редкоземельных магнитов исследователями американской военно-воздушной базы Wright Patterson число занятых в их выпуске составляло 6 тыс. чел., то сейчас трудится всего 600 [6]. Главная проблема в развитии редкоземельной промышленности в США – отсутствие мощностей по обогащению, легированию и конечному производству РЗМ.

Китай же, в свою очередь, проводил откровенно протекционистскую политику по отношению к собственным внутренним компаниям. Это было сигналом для глобальных корпораций о том, что если они хотят преференций, то обязаны размещать заводы на территории КНР. В результате американская WR Grace открыла здесь свое предприятие. Хотя попытка Китая купить контрольный пакет акций у австралийских добывающих РЗМ компаний Lynas и Ararua Resources не удалась, он все-таки позже приобрел их миноритарный пакет. А в 2010 г. КНР после одного из инцидентов прекратила поставки редкоземельных металлов Японии, продемонстрировав таким образом свою способность контролировать глобальные процессы и возможность использования силы для реализации своей стратегии. Только одна американская компания – Electrical Energy Corporation – производит самарий-кобальтовые магниты, используя гадолиний, который не добывается в США. Кроме того, необходимые в небольших количествах диспозиум и тербий также можно получить только в КНР. Поэтому производители из США и других стран даже с существующей инфраструктурой не могут начать работу без постоянных поставок РЗМ из Китая.

В 2012 г. американская горнодобывающая корпорация Molycorp Inc. – единственный крупный производитель РЗМ в США, приобрела NEO Material Technology Inc., в которой КНР принадлежит 62% акций. Эта сделка оказалась выгодна Китаю. США обладают компетенциями, но не имеют мощностей по переработке оксидов в металлы. В результате Molycorp была вынуждена отгружать все добываемые на своей территории РЗЭ на заводы, расположенные в КНР, а США попали в зависимость от Китая в области материалов для редкоземельных магнитов. Сложившаяся ситуация стимулировала Австралию, Канаду и США интенсифицировать добычу на собственных месторождениях РЗЭ (табл. 1). В результате доля Австралии на рынке РЗМ выросла с 1% в 2011 г. до 3% в 2012 г., а США (с разработкой месторождения Mountain Pass) достигла 6% [7].

Страна	Добыча, 2015 г., тыс. т	%	Добыча 2016 г., тыс. т	%	Запасы, 2016 г., тыс. т	%
США	5,9	4,5	-	-	1400	1,2
Австралия	12	9,2	14	11,1	3400	2,8
Бразилия	0,880	0,7	1,1	0,9	22 000	18,3
Канада	-	-	-	-	830	0,7
Китай	105	80,8	105	83,3	44 000	36,7
Гренландия (Дания)	-	-	-	-	1500	1,3
Индия	1,7	1,3	1,7	1,3	6900	0,6
Малайзия	0,5	0,4	0,5	0,4	30	0,1
Малави	-	-	-	-	136	-
Россия	2,8	2,2	3,0	2,4	18000	15,0
ЮАР	-	-	-	-	860	0,7
Таиланд	0,76	0,6	0,8	0,6	Н.св.	Н.св.
Вьетнам	0,25	0,2	0,3	0,2	22 000	18,3
Мир в целом	130	100	126	100	120 000	-

Источник: [4]

Таблица 1. Запасы и добыча РЗМ по основным странам мира

В 2015 г. Molycorp обанкротилась, и теперь все производство высокотехнологичных гаджетов в Соединенных Штатах зависит от закупок РЗМ в Китае. Сейчас КНР контролирует около 80% всех мировых поставок этих элементов и еще более значительную долю в производстве редкоземельных магнитов – эти рынки в общей сложности оцениваются в 13 млрд долл. в год. В США в начале 2022 г. подготовили программу масштабных инвестиций в расширение национальных цепочек получения критически важных полезных ископаемых – инициатива «Made in America», которая призвана снизить зависимость страны от китайских природных ресурсов при выпуске электроники. КНР принадлежит основная часть мирового рынка переработки кобальта, лития и РЗЭ, а также реализации составов для изготовления высокотехнологичных товаров. Как отметили в Белом доме, спрос на литий, кобальт и редкоземельные элементы, используемые при производстве компьютеров и потребительской электроники, в ближайшие десятилетия увеличится на 400–4000%.

Сферы применения

На рис. 5 показаны основные сферы применения редкоземельных металлов в глобальной экономике.

Каждый из представленных в табл. 2 товаров содержит несколько видов РЗМ. Например, в изготовлении нефтяных катализаторов используются лантан и церий, магнитов – празеодим и неодим. В табл. 3 приведены данные о РЗМ, задействованных при производстве айфона Apple. Этот простой пример иллюстрирует важное значение редкоземельных металлов для современной экономики.

Нашедшие применение с 1960-х гг. в катализаторах крекинга нефти церий и лантан нужны в нефтепереработке для отделения легких фракций

от тяжелых. Цеолиты (алюмосиликаты), к которым добавляются РЗМ, позволяют ускорить этот процесс. Иттрий также необходим в нефтехимии для полимеризации этилена. На нефтяные катализаторы приходится до 15% рынка редкоземельных металлов. Спрос здесь напрямую связан с ростом получения легких фракций, таких как бензин и керосин.



Рис. 5. Структура использования РЗМ по сферам применения

Начало использования РЗМ в автокатализаторах относится к 1970-м гг., первопроходцами в этом были США. Перспективы у этого направления, занимающего 6% рынка, достаточно благоприятные, учитывая быстрый рост автомобильной промышленности в развивающихся странах, особенно в Китае и Индии.

Ряд редкоземельных металлов (например, лантан и церий) применяются при производстве никелевых батарей для гибридных автомобилей, прежде всего в США и Японии, компании которых доминируют на рынке. Крупным потребителем является также промышленность электрических велосипе-

дов в Китае. На батареи приходится 9% рынка РЗМ. Такова же их доля и в отношении стекла. Добавление церия и других редкоземельных металлов увеличивает коэффициент его рефракции и, следовательно, повышает качество линз, расширяет цветовую гамму, позволяет поглощать ультрафиолетовое излучение и используется в солнечных батареях. Некоторые виды стекла с присутствием лантана применяются в приборах ночного видения, а также в оптоволокне для инфракрасной сверхпроводимости. Иттрий придает стеклу повышенную жаропрочность и удароустойчивость. Эрбий необходим для нового поколения оптоволоконных кабелей и передачи данных на далекие расстояния.

Одно из наиболее ранних направлений использования РЗО – полировка стекла. Для этого необходимы так называемые мишметаллы – комбинация из лантана, церия и празеодима при ведущей роли церия. На долю этого сегмента рынка приходится 13% всех РЗМ. Кроме того, церий применяется для шлифовки компьютерных жестких дисков. Несмотря на зрелость отрасли перспективы ее дальнейшего развития представляются достаточно стабильными.

В металлургии РЗМ занимают 9% рынка. Мишметаллы и соединения неразделенных РЗМ традиционно задействованы при производстве абразивов. Лантан добавляется в сталь для повышения ее пластичности, а также в молибден для улучшения сопротивления высоким температурам. Церий – в чугунное литье при производстве автомобильных двигателей для усиления их прочности. Кроме того, он применяется в магниевых отливках, необходимых в авиационных двигателях для большей стойкости к высоким температурам.

Редкоземельные металлы необходимы в люминофорах для обеспечения оптимального уровня освещения, а также при производстве телевизионных мониторов, плазменных телевизоров и ЖК-дисплеев. Смесь РЗМ использовалась для газового освещения еще в 1880-х гг. В лампах с угольными электродами, уже вышедшими из употребления, присутствовал лантан. Европий первым из РЗМ, в 1965 г., стал применяться в осветительном оборудовании, когда цветные телевизоры заняли доминирующие позиции на американском рынке. Люминофоры на основе тербия дают зеленый свет, европия – красный, иттрия – голубой. В своем сочетании они могут обеспечивать любую комбинацию освещения. Соответственно, свету люминесцентных ламп можно придать любую цветовую гамму определенным набором люминофорного покрытия.

Сферы применения	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Y	Прочие
Магниты	-	-	23	69	-	-	2	-	5	-	-
Батареи	50	33	3	10	3	-	-	-	-	-	-
Металлические сплавы	26	52	6	16	-	-	-	-	-	-	-
Автокатализаторы	5	90	2	3	-	-	-	-	-	-	-
Катализаторы крекинга нефти	90	10	-	-	-	-	-	-	-	-	**
Полириты	31	65	4	-	-	-	-	-	-	-	-
Добавки в стекло	24	66	1	3	-	-	-	-	2	4	-
Люминофоры	8	11	-	-	-	5	2	5	-	69	-
Керамика	17	12	6	12	-	-	-	-	-	53	-
Прочие	19	39	4	15	2	-	1	-	-	19	-

La – лантан, Ce – церий, Pr – Празеодим, Nd – Неодим, Sm – Самарий, Eu – Европий, Gd – Гадолиний, Tb – тербий, Dy – Диспрозий, Y – Иттрий

Таблица 2. Структура использования отдельных РЗМ в производстве основных промежуточных товаров, %

Компоненты	Y	La	Ce	Pr	Nd	Eu	Gd	Tb	Dy
Цветной экран	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Полировка стекла	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Интегральные схемы	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Микрофоны	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Узлы вибрации	*	*	*	*	*	*	*	*	**

Таблица 3. Использование РЗМ в производстве айфона Apple

Иттриевые добавки в диоксид циркония улучшают свойства последнего и используются в разнообразных областях: стоматологии, производстве авиационных двигателей, газовых турбин, сенсоров, ювелирных украшений, огнеупорной керамики, термопластичных материалов и др. Неодим, празеодим и эрбий придают уникальные цвета керамической плитке, востребованной в строительной индустрии. Цериевые добавки в циркониевые плитки использовались в космических шаттлах.

Важнейшая сфера – применение РЗМ в электронике в качестве допирующих присадок к бариево-титановым диэлектрикам, являющимся основой для производства однослойных и многослойных керамических бескорпусных конденсаторов. Алюмоиттриевый гранат, выращенный в виде кристалла и легированный неодимом и церием, – важная часть твердокристаллических лазерных систем, необходимых в хирургии и общем машиностроении. В оборонной промышленности такие лазеры нужны для определения широкого диапазона целей, в том числе под водой.

Железо-иттриевые и гадолиний-галлиевые гранаты присутствуют в разнообразных микроволновых компонентах, к примеру СВЧ-циркуляторах и резонаторах. Некоторые высокочастотные беспроводные коммуникационные системы используют микроволновые фильтры, изготовленные из оксида церия с добавками неодима и самария. На это направление приходится 5% глобального рынка РЗМ.

До изобретения редкоземельных магнитов на рынке преобладали алюминий-никель-кобальт и ферритовые варианты. В 1970 г. на смену им пришли самарий-кобальтовые – это был один из самых ранних случаев использования самария. Из-за проблем с поставками кобальта в начале 1980-х гг. компании Hitachi и General Motors разработали Nd-Fe-B (неодим-железо-бор) вариант, нашедший коммерческое использование в 1986 г. Он стал технологической основой применения магнитов в промышленности и заменил ранее самариевое поколение. Такие магниты необходимы для производства электромоторов любых размеров, прежде всего в гибридных двигателях, ветряных турбинах и обычных силовых установках.

Постоянные редкоземельные магниты – также ключевой компонент труб высокого давления, являющихся важной частью радаров и всех видов коммуникационных систем. Используются они и в производстве компьютерных жестких дисков и лазерных проигрывателей, всех видов микрофонов, незаменимы в активаторах, применяемых в авиационных

и ракетных системах, в спутниках. На магниты приходится 20% рынка редкоземельных металлов.

В последние годы спрос на РЗЭ в современных отраслях промышленности заметно увеличивается [12–14]. Составляя сами по себе небольшую часть валового национального продукта, они выступают важнейшим составным элементом факторов производства в цепочках добавленной стоимости других товаров и продуктов.

Сегодня Китай является лидером по добыче и использованию РЗЭ. Следует отметить, что в ближайшие 5–10 лет их получение и потребление вырастет в разы. В России имеются колоссальные запасы этого сырья, но они пока не разрабатываются. При правильной государственной политике эта страна может занять доминирующее место на мировом рынке по добыче редкоземельных металлов, а вместе с Республикой Беларусь в рамках Союзного государства значительно повысить конкурентоспособность многих отраслей за счет применения редкоземельных элементов в выпускаемой продукции. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А.А. Никулин. Металлы для высоких технологий: тенденции мирового рынка редкоземельных элементов // Проблемы национальной стратегии. 2014. №1. 134–152.
2. Ю.Л. Адно. «Витамины роста» в промышленности высоких технологий // Металлы Евразии. 2016. №4. С. 36–40.
3. B. Sprecher, I. Daigo, S. Murakami, R. Kleijn, M. Vos, G.J. Kramer. Framework for Resilience in Material Supply Chains, With a Case Study from the 2010 Rare Earth Crisis // Environmental Science & Technology. 2015. №11, 6740–6750 // <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b00206>.
4. US Geological Survey (2017) Mineral Commodity Summaries 2017 // Journal of Transportation Technologies. 2018. Vol. 8, №3 // <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2017/mcs2017.pdf>.
5. Dominating the World. China and the Rare Earth Industry / National Institute of Advanced Studies. – Bangalor, 2013.
6. P. Dent. Rare earth elements and permanent magnets // Journal of Applied Physics. 2012 // <https://doi.org/10.1063/1.3676616>.
7. В.Б. Кондратьев. Минеральные ресурсы и будущее Арктики // Горная промышленность. 2020. №1. С. 87–96.
8. Humphries M. Rare Earth Elements: The global Supply Chain // CRS Report for Congress. 2013. December 16. P. 15.
9. Green J. Defense, Energy Markets Should Brace for Shortages of Key Materials // National Defense Industrial Association. 2009. October. P. 28.
10. Rare Earth Elements – Critical Resources for High Technology // U.S. Geological Survey Fact Sheet. 2002. November. P. 4.
11. Rare Earths: Market Outlook to 2020, Roskill, London // U.S. Geological Survey Fact Sheet 087–02 Rare Earths: Market Outlook to 2020, Roskill, London. USGS Critical Minerals Review: 2021U.S. Geological Survey Fact Sheet 087–02/ MAY 1, 2022
12. Образцова М. Редкоземельные элементы – стратегические металлы будущего // <https://news.climate.columbia.edu/2012/09/19/rare-earth-metals-will-we-have-enough/>.
13. С. Пирогов, Н. Куйдо. Инвестиционная идея: редкоземельные металлы. Обзор рынка // <https://invest-heroes.ru/articles>.
14. Т. Оганесян. Конкуренция на редких землях // Электронный журнал «Стимул». 2022. <https://t.me/stimul-innovations>.