

Научная статья

УДК 338.3

JEL Q30

DOI 10.25205/2542-0429-2021-21-4-124-145

Прогноз динамики спроса на мировом рынке редкоземельных металлов

Виктор Анатольевич Яценко¹
Маргарита Евгеньевна Лебедева²

^{1, 2} Институт экономики и организации промышленного производства
Сибирского отделения Российской академии наук
Новосибирск, Россия

¹ yva@ieie.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9129-2090>

² lebedeva@ieie.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5289-1074>

Аннотация

Рынок редкоземельных металлов (РЗМ) относительно молод, поскольку его стремительное развитие началось только в середине XX в. С тех пор по мере развития человеческого общества и научно-технологического прогресса глобальный спрос постоянно растет. Это приводит к увеличению объемов добычи на существующих месторождениях, а также форсируется разработка новых проектов освоения редкоземельных минерально-сырьевых ресурсов по всему миру, и создаются стратегические запасы сырья в странах с развитой высокотехнологичной промышленностью в условиях монополии Китая на рынке. Поэтому важно понимать баланс и динамику спроса и предложения на рынке РЗМ в долгосрочной перспективе. Смогут ли производители наращивать мощности для удовлетворения быстро растущего спроса? Какой объем РЗМ будет востребован в будущем, какова структура этого спроса?

В данной работе проведено прогнозирование динамики спроса на мировом рынке РЗМ до 2050 г. на основе разных сценариев. Оценки будущего уровня спроса основывались на исторических данных в разрезе отраслей потребления. Сопоставлялись результаты прогнозов трех сценариев: экспоненциальная динамика спроса на основе полных исторических данных, продолжение линейного тренда последнего десятилетия с использованием регрессионной модели и, наконец, включение в модель регрессии прогнозных оценок растущего спроса на РЗМ со стороны «зеленой энергетики» на основе отчета «The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions» Международного агентства по энергетике.

На основе результатов получен интервал значений оценок прогнозируемого мирового спроса на РЗМ, который могут удовлетворить компании-производители со стороны предложения на ближайшие 15–20 лет, среди которых есть и отечественные. Однако может возникнуть дефицит некоторых редкоземельных элементов, которые так востребованы для перехода к «зеленой энергетике».

Ключевые слова

редкоземельные металлы, рынок, спрос, предложение, промышленность, прогнозирование, «зеленая энергетика»

Источник финансирования

Исследования выполнялись при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-18-00170)

© Яценко В. А., Лебедева М. Е., 2021

ISSN 2542-0429

Мир экономики и управления. 2021. Том 21, № 4. С. 124–145

World of Economics and Management, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 124–145

Для цитирования

Яценко В. А., Лебедева М. Е. Прогноз динамики спроса на мировом рынке редкоземельных металлов // Мир экономики и управления. 2021. Т. 21, № 4. С. 124–145. DOI 10.25205/2542-0429-2021-21-4-124-145

Demand Forecasting in World Rare Earth Metals Market

Viktor A. Yatsenko¹, Margarita E. Lebedeva²

^{1,2} Institute of Economics and Industrial Engineering
of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russian Federation

¹ yva@ieie.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9129-2090>

² lebedeva@ieie.nsc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5289-1074>

Abstract

The rare earth metals (REM) market is relatively young, because its rapid development began only in the middle of the 20th century. Since then, global demand has been constantly growing with the development of human society, scientific and technological progress. This leads to an increase in production volumes at existing fields, new projects for the development of rare earth mineral resources are emerging all over the world, strategic reserves of raw materials are being created in countries with a developed high-tech industry in the conditions of China's monopoly on the market. Therefore, it is important to understand the balance and dynamics of supply and demand in the REM market in the long term. Will manufacturers be able to increase capacity to meet the rapidly growing demand? What volume of REM will be in demand in the future, what is the structure of this demand?

In this paper, demand forecasting in the global REM market up to 2050 is carried out on the basis of different scenarios. Estimates of the future level of demand were based on historical data in the context of consumption sectors. The forecasts results of three scenarios were compared: the exponential demand dynamics based on complete historical data, the continuation of the linear trend of the last decade using a regression model, and, finally, the inclusion in the regression model of forecast estimates of the growing demand for REM from the "green energy", which are based on the report "The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions" of the International Energy Agency. Based on the results, an interval of forecast values of global demand for REM has been obtained, which can be satisfied by manufacturing companies from the supply side for the next 15–20 years (including domestic ones). However, there may be a shortage of some rare earth elements that are so in demand for the transition to "green energy".

Keywords

rare earth metals, market, demand, supply, industry, forecasting, "green energy"

Funding

The research has been carried out with the financial support of the Russian Science Foundation (project no. 19-18-00170)

For citation

Yatsenko V. A., Lebedeva M. E. Demand Forecasting in World Rare Earth Metals Market. *World of Economics and Management*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 124–145. (in Russ.) DOI 10.25205/2542-0429-2021-21-4-124-145

Введение

После того как в 1794 г. финский химик Й. Гадолин открыл новый элемент иттербит¹, потребовалось более 150 лет, чтобы открыть и идентифицировать всю группу редкоземельных элементов (РЗЭ)². Случилось это в 1945 г., когда американские химики Д. Маринский, Л. Гленденин и Ч. Кориэлл в Окриджской национальной лаборатории (штат Теннесси) смогли хроматографически выделить прометий из продуктов деления урана в атомном котле [1]. На протяжении этого периода производство и потребление РЗМ во всем мире составляло менее 4 тыс. т вплоть до 1953 г., когда Национальный комитет по телевизионным стандартам США³ принял новую технологию аналогового цветного телевидения компании «Radio Corporation of America» (RCA), которая в результате стала единым вещательным стандартом в стране. С этого момента началось серийное производство цветных телевизоров, для производства которых использовался европий как активный компонент красных и синих люминофоров в экранах [3].

Начиная с 1960-х гг. РЗМ начали широко использоваться благодаря развитию телевидения, металлургии, нефтяной и полупроводниковой промышленности, и уже к 1995 г. производство РЗМ достигло уровня 80 тыс. т⁴. А благодаря развитию микроэлектроники, автомобильной промышленности и переходу на возобновляемую энергетику этот показатель составил примерно 240 тыс. т в 2020 г.⁵ По мере развития человеческого общества и научно-технологического прогресса глобальный спрос на РЗМ продолжает расти. Поэтому важно понять, какие существуют варианты этого роста и будет ли предложение редкоземельной продукции (концентратов, оксидов и индивидуальных металлов) достаточным, чтобы удовлетворить этот растущий спрос в долгосрочной перспективе.

Ответ на поставленный вопрос важен, поскольку, с одной стороны, в земной коре РЗМ не являются относительно редкими, они более распространены, чем, например, многие цветные и драгоценные металлы. С другой стороны, месторождения с промышленными концентрациями руд менее распространены, чем для большинства других полезных ископаемых [4]. Причем эти руды являются комплексными, поскольку в них содержатся не только все РЗЭ, но еще могут быть

¹ Ytterbite, позже Gadolinite [1].

² Редкоземельные элементы (РЗЭ), или редкоземельные металлы (РЗМ), представляют собой группу из 15 лантаноидов, имеющих порядковые номера от 57 до 71 (лантан, церий, празеодим, неодим, прометий, самарий, европий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций), иттрий, иногда скандий (порядковые номера соответственно 39 и 21). РЗМ разделяют на три группы по их атомному весу: легкие (La, Ce, Pr, Nd), средние (Sm, Eu, Gd) и тяжелые (Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y) (в западной литературе часто делят на две группы: легкие (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu) и тяжелые (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y)). С учетом конфигурации электронов в атомах РЗМ делят на цериевую (La, Ce, Pr, Nd) и иттриевую группы (Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y) [2]. В зарубежной литературе можно встретить следующие сокращения: REE – Rare Earth Elements, REM – Rare Earth Metals, RE – Rare Earths, TR – лат. terrae rarae – «редкие земли», LREE – light REE, HREE – heavy REE, TREO – Total Rare Earth Oxides.

³ National Television System Committee (NTSC).

⁴ Здесь и далее цифры приведены в пересчете на оксиды РЗМ (TREO).

⁵ Rare Earths Statistics and Information // National Minerals Information Center: U.S. Geological Survey. URL: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information> (дата обращения 01.02.2021).

ниобий, тантал, фосфор, железо, алюминий и другие. Редкоземельный комплекс входит в одну из самых молодых горнодобывающих отраслей промышленности: суммарное производство РЗМ составило порядка 4,2 млн т за всю историю наблюдений Геологической службы США⁶ при запасах 120 млн т на 2020 г.⁷

Важно также понимать, что освоение редкоземельных источников сырья зависит от разработки новых подходов и технологий глубокой переработки сложных по составу руд. Следовательно, ценны не сами запасы, а скорость извлечения из различных источников редкоземельного сырья [5]. Причем неопределенности, связанные с геологическими, производственными, экологическими, рыночными и другими ограничениями, могут приводить к сдерживанию скорости извлечения ценных компонентов из руды [6].

1. Обзор литературы

В научной литературе и информационных источниках можно часто встретить исследования, связанные с краткосрочным и среднесрочным прогнозированием глобального спроса и предложения на рынке РЗМ. Например, данные по рынку РЗМ публикуются в ежегодных отчетах Соликамского магниевого завода⁸, в Государственных докладах «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации»⁹, в работах Международного энергетического агентства (International Energy Agency)¹⁰, информационных агентств Roskill¹¹, Adamas Intelligence¹² и мн. др. В этих документах часто анализ проводится в двух направлениях: либо со стороны спроса, либо со стороны предложения. В первом случае авторы оценивают потребности в редкоземельных ресурсах исходя из растущего спроса на них в высокотехнологичных отраслях. Во втором случае проводится анализ текущего уровня производства компаний, добывающих и перерабатывающих редкоземельные ресурсы, их стратегических планов по реализации новых перспективных проектов. Сопоставляя прогнозные

⁶ United States Geological Survey (USGS).

⁷ Rare Earths Statistics and Information // National Minerals Information Center: U.S. Geological Survey.

⁸ Годовые отчеты // ОАО «Соликамский магниевый завод»: [Сайт]. URL: http://смз.рф/index/godovye_otchety/0-11 (дата обращения 01.06.2021).

⁹ Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году» // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации: [Сайт]. URL: http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii (дата обращения 21.02.2021).

¹⁰ World Energy Outlook 2010 // International Energy Agency: [Website]. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2010> (дата обращения 14.02.2021); Transport, Energy and CO₂: Moving toward Sustainability // International Energy Agency: [Website]. URL: <https://www.iea.org/news/transport-energy-and-co2-moving-toward-sustainability> (дата обращения 21.02.2021); The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions // International Energy Agency: [Website]. URL: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions> (дата обращения 05.03.2021).

¹¹ Rare Earths // Roskill: [Website]. URL: <https://roskill.com/market-report/rare-earths> (дата обращения 10.04.2021).

¹² Insightful reports and chartbooks // Adamas Intelligence: [Website]. URL: <https://www.adamasintel.com/reports> (дата обращения 02.11.2020).

данные, собранные со стороны спроса и предложения, можно предсказать вероятный объем профицита или дефицита редкоземельной продукции на рынке, в том числе отдельно по оксидам и металлам в условиях балансовой проблемы [3].

При этом в литературе практически отсутствуют исследования, связанные с использованием количественных моделей долгосрочного прогнозирования спроса и предложения на РЗМ. В 2010 г. были представлены потенциальные сценарии будущего спроса на РЗМ до 2035 г. [7]. Затем появились исследования, направленные на количественное прогнозирование производства РЗМ в Китае [8–10]. И только в 2020 г. появилась работа, в которой разработаны сценарии долгосрочного прогноза глобального производства РЗМ с помощью аппроксимирующей параболической модели Ричардсона до 2200 г. [11]. Однако в этих работах исследуется либо глобальный спрос, либо предложение на рынке РЗМ.

В нашем исследовании мы объединяем данные подходы с целью получения прогнозных сценариев развития мирового рынка РЗМ с выделением вклада отдельных крупных стран-производителей, а также с учетом прогнозов развития отраслей – потребителей РЗМ.

2. Методы и данные

РЗМ используют в высокотехнологичной продукции в виде смешанных (природных) соединений или в виде оксидов и индивидуальных металлов. Они могут применяться как вспомогательные элементы (т. е. РЗМ используют в производственном процессе, но в конечном продукте они не содержатся). Например, легкие РЗМ применяются в полировальных порошках в стекольной и электронной промышленности, в катализаторах каталитического крекинга нефти и в других химических процессах. Также РЗМ применяются как легирующие добавки, которые значительно улучшают характеристики конечной продукции. Например, РЗМ играют одну из ключевых ролей для декарбонизации глобальной экономики, поскольку неодимовые магниты¹³ являются неотъемлемой частью электродвигателей, турбин, перезаряжаемых батарей, автокатализаторов, используемых для очистки выхлопных газов автомобилей; они используются для производства люминофоров, специализированных сплавов, оптики, керамики и т. д. [4]¹⁴. Причем с развитием научно-технологического прогресса глобальный спрос на РЗМ не только перманентно растет, но и может резко менять свою структуру (например, с появлением инновационной технологии или продукта, для которых

¹³ В 1985 г. американская компания «General Motors», работая совместно с японской компанией «Sumitomo Special Metals», запатентовала соединение $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. В 1986 г. была открыта компания «Magnequench», которая специализировалась на производстве неодимовых магнитов. Позже «Magnequench» стала частью американской компании «Molycorp» (после банкротства в 2014 г. была куплена компанией «Neo Material Technologies»), а «Sumitomo Special Metals» – частью японской компании «Hitachi Corporation», которая сегодня обладает более чем 600 патентами, связанными с производством неодимовых магнитов методом спекания, и лицензирует многочисленные производства по всему миру [12].

¹⁴ См. также: The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions.

потребуется новый уникальный состав РЗМ), тем самым выводя рынок из равновесия.

На наш взгляд, в истории становления мировой редкоземельной промышленности идет третья эра – эра неодимовых магнитов. Конечно, практическое использование РЗМ началось еще в конце XIX в., когда соединения РЗМ начали применять в производстве газонакалильных сеток для осветительных газовых и керосиновых фонарей (сетки изготавливали из ThO_2 с добавкой 1 % оксида церия)¹⁵. Однако бурный прогресс в этой области начался лишь с эры европия, применяемого в изготовлении телевизионных экранов, в 1960-х гг. Затем началась эра самария (1970–1980 гг.), когда на смену ферритовым пришли самарий-кобальтовые постоянные магниты (SmCo_5 , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$), разработанные в лаборатории Air Force Material Research (США). В настоящее время доля рынка таких магнитов составляет менее 2 %, чего не скажешь о диспрозии и неодиме, которые не имели промышленного значения до середины 1980-х гг., когда было обнаружено соединение $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. С этого времени началась новая эра в производстве постоянных магнитов. Эпохи европия и самария длились 10–20 лет, а эпоха ныне дефицитных неодима и диспрозия продолжается уже более 30 лет, и сегодня никто не скажет, сколько она продлится [3].

Каждая эпоха формирует уникальную структуру высокотехнологичных отраслей промышленности, в которых для производства продукции необходимы РЗМ (рис. 1). Например, за период 2000–2020 гг. значительно увеличилась доля доминирующей области потребления РЗМ – производство неодимовых магнитных материалов, а доли таких областей, как производство люминофоров, стекла и оптики, сократились, доли других областей потребления остались на одном уровне.

После кризиса на рынке РЗМ в 2009–2010 гг., связанного со значительным сокращением экспортных квот со стороны Китая, глобальный спрос остался на высоком уровне (рис. 2) [4; 12; 13]. Чтобы удовлетворить его в краткосрочном периоде, высокотехнологичные страны Европы, Азии и Америки были вынуждены открыть доступ к стратегическим государственным запасам сырья [4]. Сложившиеся условия стали стимулом к росту нелегального производства редкоземельного сырья в Китае, которое было распространено в то время, и с которым активно начали бороться государственные власти в дальнейшем [4; 12; 13]¹⁶. Ключевым же является тот факт, что неопределенность, связанная с монопольным положением Китая в отрасли, и высокие цены в 2010–2011 гг. на критически важные РЗЭ для высокотехнологичных отраслей промышленности, стала стимулом к появлению новых проектов освоения редкоземельных источников

¹⁵ Карл Ауэр фон Вельсбах открыл яркое свечение оксидов церия и других РЗЭ при высоких температурах в 1885 г., доказал, что дидим является смесью неодима и празеодима, изобрел искусственный кремний для зажигалок, состоящий из мишметалла и цериево-железного сплава. Основал в 1900 г. большую химическую лабораторию на металлургическом заводе в городе Трайбах (Австрия), на основе которого возникла компания Treibacher Industrie AG. См.: Our company // Treibacher Industrie AG. URL: <https://www.treibacher.com/en/company.html> (дата обращения 05.03.2018).

¹⁶ См. также: Rare Earths // Roskill: [Website]; Insightful reports and chartbooks // Adamas Intelligence: [Website].

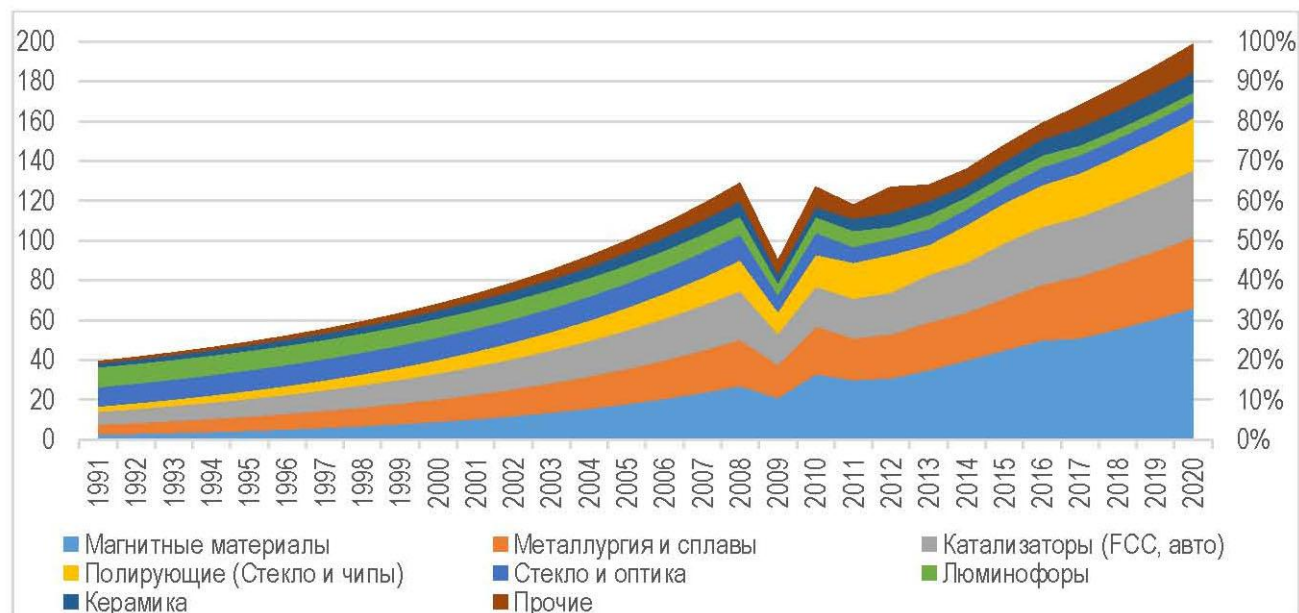


Рис. 1. Структура мирового потребления РЗМ в 2000–2020 гг. (слева – тыс. т, справа – %)

Источники:

URL: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information> (дата обращения 01.02.2021);
http://смз.рф/index/godovye_otchety/0-11 (дата обращения 01.06.2021); [4]

Fig. 1. The world rare earth consumption structure in 2000–2020 (left – kt, right – %)

Sources:

<https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information> (accessed 01.02.2021);
http://смз.рф/index/godovye_otchety/0-11 (accessed 01.06.2021); [4]

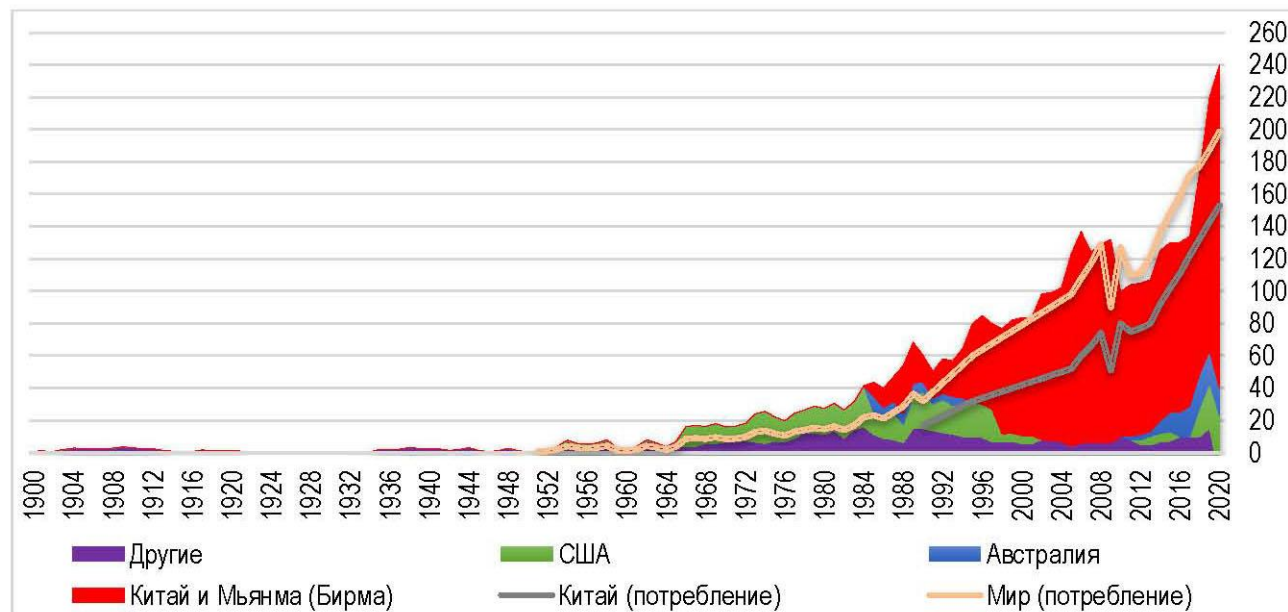


Рис. 2. Соотношение глобального производства и потребления РЗМ, тыс. т

Источники:

URL: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information> (дата обращения 01.02.2021);

http://смз.рф/index/godovye_otchety/0-11 (дата обращения 01.06.2021); [4]

Fig. 2. The comparison world REE production and consumption, kt

Sources:

<https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information> (accessed 01.02.2021);

http://смз.рф/index/godovye_otchety/0-11 (accessed 01.06.2021); [4]

сырья по всему миру [1; 4; 14]¹⁷. Например, в 2011 г. австралийская компания «Lynas» начала добычу на месторождении Mountain Weld (Западная Австралия), откуда руда поставляется на современный завод «Lynas Advanced Materials Plant» в Малайзии для обогащения и производства редкоземельной продукции¹⁸. В настоящее время мощность производства РЗМ находится на уровне 20–22 тыс. т (см. рис. 2 и таблицу). Другой пример – восстановление добычи на месторождении Mountain Pass (США). В 2017 г. две американские инвестиционные группы: HL Capital Group LLC и QVT Financial LP, выкупили лицензию на месторождение. Для операционной деятельности была основана компания MP Materials, которая начала добычу и обогащение руды в 2018 г., и вышла на уровень 26 тыс. т РЗМ-продукции уже в 2019 г. (см. рис. 2 и таблицу)¹⁹.

В настоящей статье мы будем предполагать, что глобальный спрос всегда будет поддерживаться со стороны предложения за счет появления новых источников редкоземельного сырья. В пользу этой гипотезы говорит тот факт, что, согласно данным USGS, в мире выявлено порядка 800 редкоземельных месторождений и рудопроявлений на суше²⁰, и нет сомнений, что это количество будет только увеличиваться. Например, в США по категории «Подсчитанные и установленные ресурсы» (Measured and indicated resources)²¹ выявлено 2,7 млн т РЗМ, в Канаде – 15 млн т, а также в России – 33 млн т²² на 2020 г.²³ При этом та часть полезных ископаемых по категории «Запасы» (Reserves)²⁴, которые могли быть интересны для добычи с экономической точки зрения на момент определения, меняется с течением времени в зависимости от экономических и институциональных условий (рис. 3).

Высокое значение имеют глубоководные породы и ил на дне юго-восточной и центральной частей Тихого океана, в которых, по разным оценкам, могут находиться сопоставимые, а возможно, даже превышающие материковые, запасы РЗМ. Также высокотехнологичные страны мира стремятся к более рациональному использованию ресурсов и к экономике замкнутого цикла, что предполагает переработку продуктов конечного использования [4]²⁵.

¹⁷ Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году».

¹⁸ Твердые карбонаты (Ce и LaCe) или оксалаты РЗМ, оксиды NdPr, Ce, LaCe, а также оксид SmEuGd. См: Lynas operates in Australia and Malaysia // Lynas Rare Earths: [Website]. URL: <https://lynasrareearths.com/about-us/locations> (дата обращения 08.07.2020).

¹⁹ MP Materials owns and operates Mountain Pass, the only Rare Earth mining and processing site in North America. URL: <https://mpmaterials.com/about> (дата обращения 19.06.2019).

²⁰ Rare earth element mines, deposits, and occurrences // U.S. Geological Survey: [Website]. URL: <https://mrdata.usgs.gov/ree> (дата обращения 17.03.2021).

²¹ Согласно классификации минерально-сырьевых запасов и ресурсов США.

²² Согласно национальной классификации минерально-сырьевых запасов и ресурсов по категориям А, В, С₁ и С₂.

²³ См. также: Rare Earths Statistics and Information // National Minerals Information Center: U.S. Geological Survey: [Website]; Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году» // Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации: [Сайт].

²⁴ Согласно классификации минерально-сырьевых запасов и ресурсов США.

²⁵ См. также: The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions // International Energy Agency: [Website].

Оценка ресурсов международных компаний и проектов по разработке редкоземельных элементов
Resource estimates of international rare earth companies and projects

Компания	Проект	Страна месторождения	Оценка запасов			Производство РЗМ-сырья, тыс. т/год
			Запасы, млн т	Содержание TREO		
				%	тыс. т	
Lynas	Mt Weld	Австралия	24	7,9	1 890	22
RareX	Cummins Range					8
Arafura Resources	Nolans		56	2,6	1 460	14
Hastings Technology	Yangibana		17	1,3	216	8
	Brockman					
Northern Minerals	Browns Range		9	0,63	57	5
Australian Strategic Materials	Dubbo					
Peak	Ngualla		42	4,2	1 760	10
Greenland	Kvanefjeld	Гренландия	122	1,4	1 710	29
«Mineracao Serra Verde»	Serra Verde	Бразилия	911	0,12	1 093	26
Vital Metals	Nechalacho	Канада				5
«Rainbow Rare Earths»	Gakara	Бурунди				10
«Reenova Investment Holding»	Tantalus	Мадагаскар				10
Ловозерский ГОК		Россия				10
ТриАрк Майнинг	Томтор		3232,9	11,99	–	20

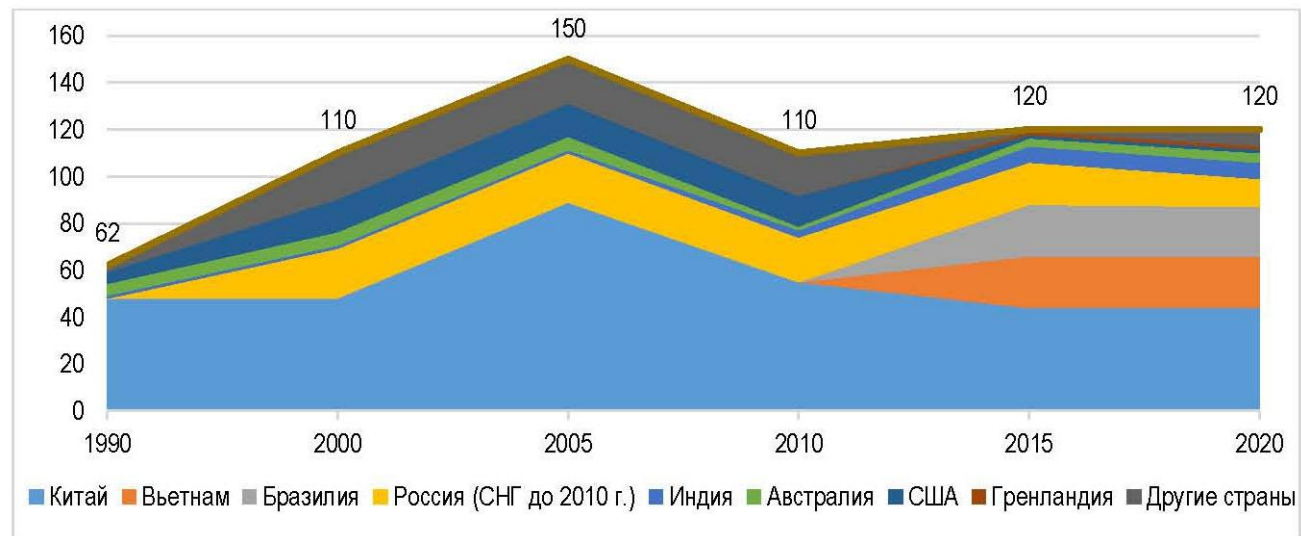


Рис. 3. Мировые запасы по категории «Запасы» («Reserves»), млн т

Источник:

<https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information> (дата обращения 01.02.2021)

Fig. 3. World reserves, mt

Source:

<https://www.usgs.gov/centers/nmic/rare-earths-statistics-and-information> (accessed 01.02.2021)

В итоге появление новых источников редкоземельного сырья будет зависеть от соотношения спроса и предложения на рынке РЗМ. Динамика на рынке определяется изменением цен на редкоземельную продукцию: высокие цены – стимул к появлению новых проектов освоения источников редкоземельного сырья, низкие цены – отказ в данный момент от реализации этих проектов.

3. Результаты и дискуссия

3.1. Оценка будущего спроса

Поскольку рынок редкоземельной продукции является относительно новым и молодым (по сравнению с товарными рынками базовых металлов в мире), то оценка будущего спроса является сложной задачей, учитывая революционный технологический скачок за последний век. К сожалению, такая фундаментальная неопределенность появления и развития новых технологий заставляет говорить только о трендах будущего спроса. Поэтому необходимо исследовать широкий спектр возможных сценариев с помощью набора разных методов прогнозирования.

На начальном этапе такого рода исследований мы остановились на следующих сценариях. Первый будет опираться на метод, заключающийся в оценке будущего совокупного спроса на основе исторических темпов роста. Результатом данного метода будет экспоненциальная зависимость – уравнение среднегодового темпа роста²⁶. Во втором сценарии будем предполагать, что в течение прогнозируемого периода не произойдет смена доминирующей области потребления, а глобальный прогнозируемый спрос будет строиться на исторических данных с использованием регрессионной модели. Третий сценарий будет основан на предположении об опережающем развитии доминирующей области применения РЗМ для перехода к экологически чистой энергетике согласно отчету Международного энергетического агентства²⁷. В этом сценарии прогнозируется потребность в редкоземельных ресурсах для производства электромобилей, аккумуляторов, ветровых турбин, использования водородных электролизеров и топливных элементов.

Ретроспективный анализ за период 1951–2020 гг., с момента, когда началось применение РЗМ в промышленных объемах в телевизионной индустрии, а далее в металлургии, нефтяной и полупроводниковой промышленности, показывает, что среднегодовой темп роста глобального спроса и предложения составляет 4,1 и 4,3 %, соответственно (рис. 4). Это подтверждает тот факт, что многие страны с высокотехнологичной промышленностью часть произведенной или импортируемой редкоземельной продукции перевели в стратегические запасы для обеспечения национальной безопасности страны. Если такая тенденция роста глобального спроса сохранится в рамках первого сценария, то мировое потребление вырастет примерно в 3,3 раза и составит порядка 663 тыс. т. Причем доля производства магнитных материалов на основе неодима и диспрозия, вероятно, про-

²⁶ В зарубежной литературе – a compound annual growth rate (CAGR).

²⁷ International energy agency (IEA). См. также: The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions // International Energy Agency: [Website]. URL: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions> (дата обращения 05.03.2021).

должит расти с 33 % в 2020 г. до 37 % к середине века (см. рис. 2, 4), что усилит балансовую проблему для производителей.

Проведенные математические вычисления показывают, что построенная линейная регрессионная модель дает близкие результаты со сценариями опережающего развития мировой энергетики согласно докладу IEA: Stated Policies Scenario (STEPS) и Sustainable Development Scenario (SDS)²⁸. Первый сценарий предполагает развитие мировой энергетики в соответствии с существующими политическими мерами и планами относительно энергетического сектора. По данным IEA, спрос на РЗМ со стороны «зеленой энергетики» в 2020 г. составил 6,4 тыс. т. Согласно сценарию STEPS, прогнозируется рост потребления РЗМ до 18,9 тыс. т к 2030 г. и до 21,8 тыс. т к 2040 г. Если такая тенденция сохранится, то глобальный спрос на редкоземельное сырье может достигнуть уровня 500 тыс. т к 2050 г., в том числе на магнитные материалы – 179 тыс. т (рис. 5).

Второй сценарий предполагает общемировую борьбу с пагубным изменением климата на планете в рамках выполнения Парижского соглашения²⁹. Согласно сценарию SDS, к 2050 г. странами – участниками соглашения будут полностью достигнуты нулевые показатели выбросов парниковых газов, что создаст дополнительный стимул для внедрения новых технологий в «зеленой энергетике» и, как следствие, дополнительное потребление редкоземельного сырья. В соответствии с этим сценарием спрос на РЗМ со стороны безуглеродной энергетики прогнозируется на уровне 34,2 тыс. т в 2030 г. и 46,6 тыс. т в 2040 г. Если на пути декарбонизации энергетики сохранится такая тенденция потребления РЗМ, то глобальный спрос на РЗМ может составить 544 тыс. т к 2050 г., в том числе на магнитные материалы – 219 тыс. т (рис. 5).

3.2. Оценка будущего предложения

Как мы уже отмечали в начале статьи, за всю историю наблюдений Геологической службы США суммарное производство РЗМ составило порядка 4,2 млн т к 2020 г., из которых 4,1 млн т – за период 1951–2020 гг. (см. рис. 2). Потенциал РЗМ до сих пор раскрывается по мере развития научно-технологического прогресса, появляется новая высокотехнологичная продукция, которая позволяет диверсифицировать потребление РЗМ, поэтому балансовая проблема уже не так существенно влияет на предложение и ценообразование.

По нашим оценкам, если сохранится такая тенденция роста глобального спроса со стороны промышленности, то приблизительно уже через 50–70 лет потребуются порядка 1 млн т редкоземельной продукции. При этом, по некоторым данным, доступность РЗМ-ресурсов для добычи составляет порядка 100 лет [1; 4; 7; 8; 15]. Также стоит отметить, что для высокотехнологичных отраслей

²⁸ The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions // International Energy Agency: [Website]. URL: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions> (дата обращения 05.03.2021)

²⁹ Там же.

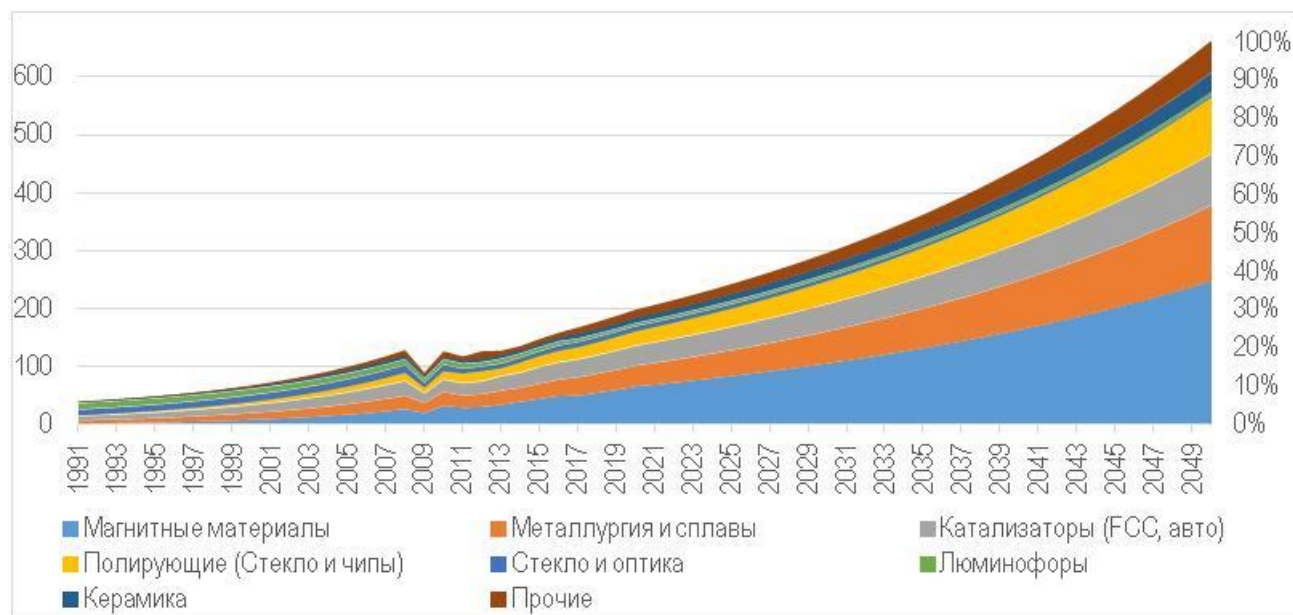


Рис. 4. Структура и прогноз мирового потребления РЗМ на 2021–2050 гг. (слева – тыс. т, справа – %)
 Fig. 4. The structure and the forecast of world rare earth consumption for 2021–2050 (left – kt, right – %)

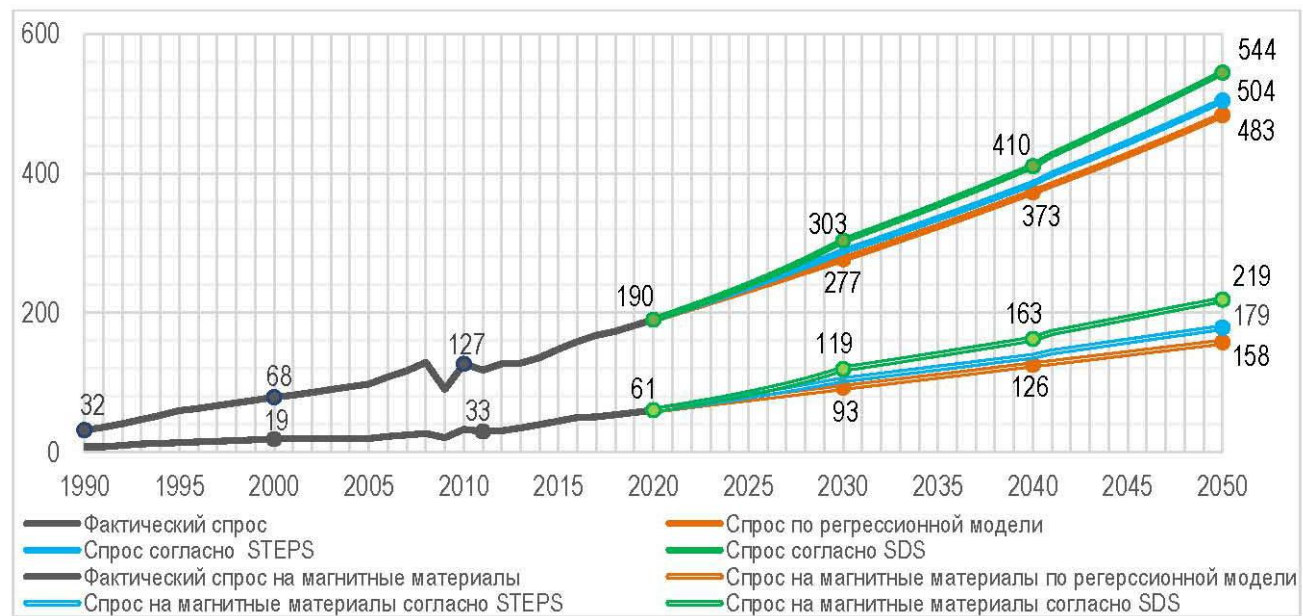


Рис. 5. Сценарии прогнозного спроса на РЗМ до 2050 г., тыс. т
 Fig. 5. The expected rare earth consumption scenarios to 2050, kt

промышленности, в том числе для перехода на «зеленую энергетику», необходимы другие ресурсы, например медь, литий, никель, цинк и пр. И именно они могут стать «бутылочным горлышком» для развития РЗМ-промышленности³⁰.

Как уже отмечалось, общий среднегодовой темп роста (CAGR) производства редкоземельной продукции за период 1951–2020 гг. составил 4,3 %, причем за последние 10 лет этот показатель вырос почти в два раза до уровня – 8,1 % (см. рис. 2) При этом доля производства Китая (добыча руды и ее обогащение до концентратов первых переделов) вначале выросла с 20 % в 1985 г. до уровня 97 % в 2005 г. от общемирового, а затем снизилась до 58 % к 2020 г. в условиях, когда началась добыча в Австралии и Африке, а также возобновилась добыча на месторождении Mountain Pass в США.

Вероятно, доля производства концентратов первых переделов в Китае будет и дальше падать, поскольку в рамках борьбы с незаконной добычей и негативным воздействием на экологическую среду страна переносит наименее ценные и наиболее экологически вредные фрагменты производства в другие страны и на шельф. Это делается с целью получить максимальную прибыль от последних стадий производства редкоземельной продукции (оксидов, металлов, специализированных сплавов) внутри страны. Поэтому, учитывая поставки редкоземельного сырья и концентратов первых переделов из Мьянмы (Бирмы), Таиланда и других стран в Китай, его реальная доля от общемирового объема производства первоначальной редкоземельной продукции сегодня составляет около 70 % [16]. Также это свидетельствует о том, что Китай, располагая всеми необходимыми компетенциями и технологической цепочкой, получает доступ к неограниченным редкоземельным минерально-сырьевым ресурсам Азиатско-Тихоокеанского региона, а значит, Поднебесная может наращивать производственные мощности еще не одно десятилетие.

Несмотря на тенденцию консолидации Китаем наиболее ценных фрагментов производства РЗМ-продукции (оксидов, металлов, специализированных сплавов), значительный спрос на критически значимые РЗМ для высокотехнологичных областей промышленности стимулирует появление новых цепочек производства вне Китая. Например, в Австралии в ближайшем будущем может возникнуть редкоземельный кластер по добыче и производству РЗМ (см. таблицу) [14]: такие компании, как «RareX», Arafura Resources, «Hastings Technology Metals» и др., планируют осваивать новые источники редкоземельного сырья. В США, помимо восстановления добычи руды на месторождении Mountain Pass, американская компания «Energy Fuels» и канадская компания «Neo Performance Materials» заключили соглашение, согласно которому обогатительное предприятие «White Mesa» (штат Юта) компании «Energy Fuels», будет из монацитового песка получать первые карбонаты РЗМ. Если опытное производство будет успешным, то планируется увеличить поставки монацитового песка с 2,5 до 15 тыс. т в год. С 2021 г. австралийская компания «Vital Metals» начала добычу на месторождении Nechalacho в Канаде и к 2025 г. планирует выйти на уровень

³⁰ The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions // International Energy Agency: [Website]. URL: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions> (дата обращения 05.03.2021).

5 тыс. т в год РЗМ-сырья. Английская компания «Rainbow Rare Earths» начала пилотную добычу руды на перспективном месторождении Gakara в Бурунди, и планирует выйти на мощность более 10 тыс. т концентрата в год к 2023 г. с дальнейшим расширением производственной цепочки до уровня оксидов РЗМ к 2025 г. С 2018 г. началась добыча ион-адсорбирующих глин на острове Мадагаскар в восточной части полуострова Ампасиндава – сингапурская инвестиционная компания «Reenova Investment Holding» (ранее «ISR Capital») начала осваивать месторождение Tantalus.

В настоящее время в России действует единственное предприятие, на котором добывают редкоземельную руду – «Ловозерский ГОК» (ЛГГОК, Мурманская область), откуда она поступает на Соликамский магниевый завод» (СМЗ, Пермский край), где получают концентраты в виде хлоридов и карбонатов РЗМ. В свою очередь, СМЗ отгружает готовую продукцию на завод «AS Silmet» (г. Силламяэ, Эстония), где производится разделение карбонатов на индивидуальные РЗМ. С 2011 г. завод «AS Silmet» принадлежит американской компании «Neo Performance Materials» (США).

Еще одним проектом с высоким потенциалом для развития отечественной редкоземельной промышленности может стать ниобий-редкоземельное месторождение Томтор (Республика Саха). В нем содержится два десятка как традиционных полезных ископаемых (железо, фосфор, титан, ванадий), так и редких элементов: ниобий, иттрий, скандий и группа лантаноидов, запасы которых на месторождении могут обеспечить потребности России на многие годы вперед. Недропользователь (компания «ТриАрк Майнинг») планирует разместить химико-металлургическое производство для переработки томторских руд на территории Приаргунского производственного горно-химического объединения (г. Краснокаменск, Забайкальский край) с объемом производства до 10 тыс. т в год разделенных оксидов РЗМ.

Появление новых проектов зависит от геологических, технологических, экономических и политических факторов, которые тяжело учесть в рамках одной работы. Однако, по нашим оценкам, даже самые агрессивные сценарии развития глобального спроса на РЗМ будут удовлетворены со стороны предложения на ближайшие 15–20 лет. С другой стороны, такой вывод является усредненным относительно уникальной структуры потребления РЗМ в высокотехнологичных отраслях промышленности в условиях балансовой проблемы. Другими словами, РЗМ для доминирующей области потребления будут чаще в дефиците на рынке, чем для других. В результате это будет приводить к росту цен в первом случае и к падению – во втором. Следовательно, источники редкоземельного сырья с большими запасами дефицитных РЗЭ будут иметь более высокий потенциал к освоению, чем другие.

3.3. Обсуждение

Проведенный анализ показал, что среднегодовой рост глобального спроса и предложения составляет соответственно 4,1 и 4,3 % за период 1951–2020 гг. Исследователи Kathryn M. Goodenough и др. (2018) предсказывали, что общий среднегодовой темп роста (CAGR) спроса составит 4,4 % в период 2016–2026 гг.,

и он достигнет 190 тыс. т за этот период [16]. Однако, по нашим оценкам, этот уровень был пройден уже в 2020 г.

Первая попытка провести подробный прогноз спроса на РЗМ была сделана Elisa Alonso и ее коллегами из Массачусетского технологического института в 2012 г. [7]. Авторы представляют пять сценариев развития спроса до 2035 г. в зависимости от разных условий и факторов. Однако сегодня можно сделать промежуточный вывод, что тенденция роста потребления РЗМ в мире находится в коридоре только между двумя сценариями из этих пяти. Первым является агрессивный сценарий, прогноз которого был построен на мнении экспертов (в частности, на работах D. J Kingsnorth [17]) и характеризуется как неясный революционный рост спроса (поскольку эксперты неявно учитывают технологический прогресс в своих оценках и прогнозах). В этом сценарии среднегодовой рост глобального спроса прогнозируется на уровне 8,6 % за период 2010–2035 гг. Вторым сценарием являются оценки будущего спроса, разработанные Международным энергетическим агентством относительно стабилизации CO₂ в атмосфере Земли на уровне 450 ppm³¹ за счет развития «зеленой энергетики», в частности за счет внедрения электромобилей и ветряных турбин в 2009–2010 гг.³² В данной работе он также характеризуется как революционный спрос. В этом сценарии среднегодовой рост глобального спроса прогнозируется на уровне 5,9 % за период 2010–2035 гг.

На наш взгляд, Elisa Alonso и ее коллеги смогли верно оценить тенденцию роста глобального спроса и факторы, формирующие этот рост, на среднесрочный период 2010–2035 гг. на ограниченных ретроспективных данных начала 2000-х гг. Действительно, за период 2010–2020 гг. (после кризиса на рынке РЗМ 2010 г.) глобальное потребление было на высоком уровне – среднегодовой рост составил 7 %, который с высокой долей вероятности вернется к своим историческим показателям в будущем. Поэтому Jianliang Wang и его коллеги не смогли сопоставить среднесрочные прогнозы спроса и долгосрочные прогнозы предложения на основе модели Ричардсона [11]. Также, на наш взгляд, простое моделирование производства РЗМ на основе исторических данных без оценок потенциала реальных проектов и источников редкоземельного сырья привело к смещению вниз прогнозных результатов будущего предложения. Однако авторы совершенно правы, что для такой молодой промышленности, как редкоземельная, сложно строить долгосрочные прогнозы, поскольку многие факторы пока невозможно учесть корректно: экологические, энергетические, геологические, экономические, политические и мн. др. Все эти факторы представляют риски для новых проектов, поэтому, учитывая растущий спрос на РЗМ и множество ограничений на добычу, производство и цепочки поставок, авторы делают вывод о высокой вероятности дефицита в будущем.

³¹ Единица измерения относительных величин, равная $1 \cdot 10^{-6}$ от базового показателя (parts per million).

³² World Energy Outlook 2010 // International Energy Agency: [Website]. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2010> (дата обращения 14.02.2021); Transport, Energy and CO₂: Moving toward Sustainability // International Energy Agency: [Website]. URL: <https://www.iea.org/news/transport-energy-and-co2-moving-toward-sustainability> (дата обращения: 21.02.2021).

Заключение

Сегодня редкоземельные металлы стали стратегическими для большинства развитых и развивающихся стран, критическими для многих высокотехнологичных отраслей промышленности, неотъемлемыми для наукоемкой продукции и для перехода к «зеленой энергетике». Поэтому чрезвычайно важно исследовать возможные варианты развития мирового редкоземельного комплекса, последовательность технологического развития, чтобы вовлекать новые источники редкоземельного сырья.

Революционное развитие микроэлектроники, автомобильной промышленности и возобновляемой энергетики предопределило наступление эры неодимовых магнитных сплавов, доля которых, по нашим оценкам, приблизится к 40 % к 2050 г. в структуре потребления РЗМ. Такой сценарий развития в мировой высокотехнологичной промышленности усилит балансовую проблему, что повлечет за собой дефицит, а следовательно, рост цен на рынке РЗМ дефицитных элементов. Однако развитие таких областей применения редкоземельных материалов, как металлургия, производство катализаторов, полирующих порошков, керамики, сможет смягчить эту проблему, поскольку будут вовлекаться легкие и среднетяжелые группы РЗМ.

В результате прогнозируется рост мирового спроса на многие десятилетия вперед. В то же время темп и траектория, которые являются ключом к пониманию баланса между спросом и предложением на редкоземельную продукцию, могут существенно отличаться в зависимости от разных условий и факторов. В статье были рассмотрены разные сценарии этого роста: на основе исторических темпов, регрессионной модели, предположения об опережающем развитии доминирующей области потребления РЗМ для перехода к экологически чистой энергетике согласно отчету Международного энергетического агентства. Эти сценарии показывают коридор значений оценок прогнозируемого мирового спроса, который к 2050 г. с большой долей вероятности окажется в интервале от 483 до 663 тыс. т (магнитные материалы – в диапазоне 158–248 тыс. т).

Наряду с этим скорость производства и вовлечения новых источников редкоземельного сырья в промышленный оборот, на наш взгляд, зависит от чрезмерно большого количества ограничений и рисков, связанных с геологическими, технологическими, экономическими и политическими факторами. Несмотря на то что Китай отдает инициативу в наименее ценных и наиболее экологически вредных фрагментах производства (добыча руды и ее обогащение до концентратов первых переделов), он имеет доступ к неограниченным редкоземельным минерально-сырьевым ресурсам Азиатско-Тихоокеанского региона и может нарастить импорт редкоземельного сырья в кратчайшие сроки.

С другой стороны, значительный спрос на критически значимые РЗМ для высокотехнологичных областей промышленности стимулирует появление новых цепочек производства в США, Австралии, России и других странах. Так, по нашим оценкам, даже самые агрессивные сценарии развития глобального спроса на РЗМ будут удовлетворены со стороны предложения на ближайшие 15–20 лет. А мировые запасы по категории «Запасы» (Reserves), согласно данным Геологи-

ческой службы США, позволят обеспечить добычу еще как минимум на 70 лет, даже если среднегодовой рост сохранится на уровне 4,3 %.

Причем Россия обладает значительной редкоземельной минерально-сырьевой базой, что говорит о высоком потенциале создания полной производственной цепочки в рамках национальных границ. Разрыв сложившихся технологических связей и цепочек поставок, связанных с общемировой пандемией коронавирусной инфекцией COVID-19, открывает широкие возможности для новых проектов и внедрения отечественной РЗМ-продукции в эти глобальные цепочки.

Список литературы

1. **Volker Zepf.** Rare Earth Elements. A New Approach to the Nexus of Supply, Demand and Use: Exemplified along the Use of Neodymium in Permanent Magnets. Berlin, Heidelberg, Springer, 2013, 162 p. DOI 10.1007/978-3-642-35458-8
2. **Быховский Л. З., Тигунов Л. П., Темнов А. В.** Об определении понятий «редкие элементы» («редкие металлы»): исторический и терминологический аспекты // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2015. № 3. С. 32–38.
3. **Binnemans K., Jones P. T.** Rare Earths and the Balance Problem. *Journal Sustainable Metallurgy*, 2015, no. 1, pp. 29–38. DOI 10.1007/s40831-014-0005-1
4. **Kooroshy J., Tiess G., Tukker A., Walton A.** (eds.). Strengthening the European rare earths supply chain: Challenges and policy options. A report by the European Rare Earths Competency Network (ERECON). 2015. Ref. Ares(2015) 2544417. URL: https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/erecon_en (дата обращения 30.09.2015).
5. **Wang J. et al.** Long-term outlook for global rare earth production. *Resources Policy*, 2020, no. 65, p. 101569. DOI 10.1016/j.resourpol.2019.101569
6. **Яценко В. А., Самсонов Н. Ю., Крюков Я. В.** Опционный подход к экономической оценке проектов разработки редкоземельных месторождений // Мир экономики и управления. 2018. Т. 18, № 4. С. 69–84. DOI 10.25205/2542-0429-2018-18-4-69-84
7. **Alonso E. et al.** Evaluating Rare Earth Element Availability: A Case with Revolutionary Demand from Clean Technologies. 2012. DOI 10.1021/es203518d
8. **Wang X. et al.** Production forecast of China's rare earths based on the Generalized Weng model and policy recommendations. *Resources Policy*, 2015, no. 43, pp. 11–18.
9. **Ge J., Lei Y., Zhao L.** China's Rare Earths Supply Forecast in 2025: A Dynamic Computable General Equilibrium Analysis. *Minerals*, 2016, vol. 3 (6), p. 95.
10. **Wang X. et al.** China's rare earths production forecasting and sustainable development policy Implications. *Sustainability* (Switzerland), 2017, no. 6 (9).
11. **Wang J. et al.** Long-term outlook for global rare earth production. *Resources Policy*, 2020, no. 65, p. 101569.
12. **Kennedy J. C.** Rare Earth Production, Regulatory USA / International Constraints and Chinese Dominance: The Economic Viability Is Bounded by Geochemistry and Value Chain Integration. In: *Rare Earths Industry: Technological, Economic, and Environmental Implications*, 2016, pp. 37–55.

13. **Яценко В. А., Самсонов Н. Ю., Крюков Я. В.** Особенности мирового рынка редкоземельных металлов // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2018. № 6. С. 68–72.
14. **Крюков В. А., Яценко В. А., Крюков Я. В.** Редкоземельная промышленность – реализовать имеющиеся возможности // Горная промышленность. 2020. № 5. С. 68–84. DOI 10.30686/1609-9192-2020-5-68-84
15. **Zhou B., Li Z., Chen C.** Global Potential of Rare Earth Resources and Rare Earth Demand from Clean Technologies. *Minerals*, 2017, no. 11 (7), p. 203.
16. **Goodenough K. M., Wall F., Merriman D.** The Rare Earth Elements: Demand, Global Resources, and Challenges for Resourcing Future Generations. *Natural Resources Research*, 2018, no. 2 (27), pp. 201–216.
17. **Kingsnorth D. J.** Meeting the challenges of rare earths supply in the next decade. In Industrial Minerals Company of Australia Pty Ltd. The Hague Centre for Strategic Studies, 2011. URL: <http://www.reिताusa.org/storage/IMCOA%202010.12%20Strategic%20Studies%20The%20Hague%20Final.pdf>.

References

1. **Volker Zepf.** Rare Earth Elements. A New Approach to the Nexus of Supply, Demand and Use: Exemplified along the Use of Neodymium in Permanent Magnets. Berlin, Heidelberg, Springer, 2013, 162 p. DOI 10.1007/978-3-642-35458-8
2. **Bykhovsky L. Z., Tiginov L. P., Temnov A. V.** On the definition of the notion of rare elements (rare metals): historical and terminological aspects. *Mineral resources of Russia. Economics and management*, 2015, no. 3, pp. 32–38. (in Russ.)
3. **Binnemans K., Jones P. T.** Rare Earths and the Balance Problem. *Journal Sustainable Metallurgy*, 2015, no. 1, pp. 29–38. DOI 10.1007/s40831-014-0005-1
4. **Kooroshy J., Tiess G., Tukker A., Walton A. (eds.).** Strengthening the European rare earths supply chain: Challenges and policy options. A report by the European Rare Earths Competency Network (ERECON). 2015. Ref. Ares(2015) 2544417. URL: https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/erecon_en (accessed 30.09.2015).
5. **Wang J. et al.** Long-term outlook for global rare earth production. *Resources Policy*, 2020, no. 65, p. 101569. DOI 10.1016/j.resourpol.2019.101569
6. **Yatsenko V. A., Samsonov N. Yu., Kryukov Ya. V.** Real-Options Approach to Economic Valuation of Rare Earths Development Projects. *World of Economics and Management*, 2018, vol. 18, no. 4, pp. 69–84. (in Russ.) DOI 10.25205/2542-0429-2018-18-4-69-84
7. **Alonso E. et al.** Evaluating Rare Earth Element Availability: A Case with Revolutionary Demand from Clean Technologies. 2012. DOI 10.1021/es203518d
8. **Wang X. et al.** Production forecast of China's rare earths based on the Generalized Weng model and policy recommendations. *Resources Policy*, 2015, no. 43, pp. 11–18.
9. **Ge J., Lei Y., Zhao L.** China's Rare Earths Supply Forecast in 2025: A Dynamic Computable General Equilibrium Analysis. *Minerals*, 2016, vol. 3 (6), p. 95.
10. **Wang X. et al.** China's rare earths production forecasting and sustainable development policy Implications. *Sustainability* (Switzerland), 2017, no. 6 (9).

11. **Wang J. et al.** Long-term outlook for global rare earth production. *Resources Policy*, 2020, no. 65, p. 101569.
12. **Kennedy J. C.** Rare Earth Production, Regulatory USA / International Constraints and Chinese Dominance: The Economic Viability Is Bounded by Geochemistry and Value Chain Integration. In: *Rare Earths Industry: Technological, Economic, and Environmental Implications*, 2016, pp. 37–55.
13. **Yatsenko V. A., Samsonov N. Yu., Kryukov Ya. V.** Osobennosti rynka redkozemel'nyh metallov [Features of the rare earth metals market]. *Mineral resources of Russia. Economics and management*, 2018, no. 6, pp. 68–72. (in Russ.)
14. **Kryukov V. A., Yatsenko V. A., Kryukov Ya. V.** Rare Earth Industry – How to take advantage of opportunities. *Gornaya promyshlennost [Russian Mining Industry]*, 2020, no. 5, pp. 68–84. (in Russ.) DOI 10.30686/1609-9192-2020-5-68-84
15. **Zhou B., Li Z., Chen C.** Global Potential of Rare Earth Resources and Rare Earth Demand from Clean Technologies. *Minerals*, 2017, no. 11 (7), p. 203.
16. **Goodenough K. M., Wall F., Merriman D.** The Rare Earth Elements: Demand, Global Resources, and Challenges for Resourcing Future Generations. *Natural Resources Research*, 2018, no. 2 (27), pp. 201–216.
17. **Kingsnorth D. J.** Meeting the challenges of rare earths supply in the next decade. In *Industrial Minerals Company of Australia Pty Ltd. The Hague Centre for Strategic Studies*, 2011. URL: <http://www.reिताusa.org/storage/IMCOA%202010.12%20Strategic%20Studies%20The%20Hague%20Final.pdf>.

Информация об авторах

Виктор Анатольевич Яценко, кандидат экономических наук

SPIN 4120-4562

WoS Researcher ID P-5762-2017

Scopus Author ID 57222078318

Маргарита Евгеньевна Лебедева, младший научный сотрудник

SPIN 7796-7563

Scopus Author ID 57194325357

Information about the Authors

Viktor A. Yatsenko, Candidate of Sciences (Economics)

SPIN 4120-4562

WoS Researcher ID P-5762-2017

Scopus Author ID 57222078318

Margarita E. Lebedeva, Junior Researcher

SPIN 7796-7563

Scopus Author ID 57194325357

Статья поступила в редакцию 19.10.2021;

одобрена после рецензирования 26.11.2021; принята к публикации 26.11.2021

The article was submitted 19.10.2021;

approved after reviewing 26.11.2021; accepted for publication 26.11.2021