



НАУКА  
И ИННОВАЦИИ  
РОСАТОМ

# АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

**КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫЕ МИНЕРАЛЫ И МАТЕРИАЛЫ  
ДЛЯ ИНДУСТРИИ 4.0: ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ  
И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НА ГЛОБАЛЬНЫХ РЫНКАХ**



**РОЛЬ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ  
МИНЕРАЛОВ И МАТЕРИАЛОВ  
В 4-Й ПРОМЫШЛЕННОЙ  
РЕВОЛЮЦИИ**

**РЭЭ В ПЕРЕДОВЫХ  
ПРОИЗВОДСТВАХ НОВОГО  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УКЛАДА**

**ОСОБО ЧИСТЫЕ ВЕЩЕСТВА И  
МАТЕРИАЛЫ: ОСОБЕННОСТИ  
ПРОИЗВОДСТВА И  
ПЕРСПЕКТИВЫ ПОТРЕБЛЕНИЯ**

**ЗАРУБЕЖНЫЕ ИНИЦИАТИВЫ  
И ПРОГРАММЫ В ПОДДЕРЖКУ  
ПРОИЗВОДСТВА КВММ**

**ПРОБЛЕМЫ И ОСОБЕННОСТИ  
ПРОИЗВОДСТВА И  
ПОТРЕБЛЕНИЯ КВММ В  
РОССИИ**

Государственная корпорация  
по атомной энергии «Росатом»  
Частное учреждение «Наука и инновации»  
Центр аналитических исследований  
и разработок

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»  
Частное учреждение «Наука и инновации»  
Центр аналитических исследований и разработок

# **КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫЕ МИНЕРАЛЫ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИНДУСТРИИ 4.0: ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НА ГЛОБАЛЬНЫХ РЫНКАХ**

Москва  
2022

УДК 621.311

ББК 31.4

М 24

М 24 Критически важные минералы и материалы для индустрии 4.0: особенности получения и перспективы применения на глобальных рынках. Аналитический отчет / Мансуров О.А., Птицын П.Б. – М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2022. – 142 с.

ISBN 978-5-498-00898-1

© ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2022

Подписано в печать 02.09.2022. Формат 60x84 1/8. Бумага мелованная.  
Гарнитура Rosatom. Печать офсетная. Усл. печ. л. 17,44.  
Тираж 100 экз. Заказ № 6175.

Отпечатано в ООО «Элефант»:  
610040, г. Киров, ул. Мостовая, д. 32/7,  
[www.hibox.pro](http://www.hibox.pro)

**НАЗВАНИЕ РАБОТЫ:**

Критически важные минералы и материалы для индустрии 4.0: особенности получения и перспективы применения на глобальных рынках.

**АВТОРЫ:**

**Мансуров О.А.**, начальник отдела ЯТЦ отраслевого Центра аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации».

**Птицын П.Б.**, заместитель директора – директор отраслевого Центра аналитических исследований и разработок частного учреждения «Наука и инновации».

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

**Ивановских К.В.**, заместитель директора по науке и инновациям АО «Гиредмет».

**РЕФЕРАТ:**

В отчете представлены обзор и анализ текущего состояния с критически важными минералами и материалами применительно к создаваемым передовым производствам нового технологического уклада. Описываются особенности происходящих процессов в мировой экономике в части технологического развития и то, каким образом это будет влиять на минерально-сырьевую базу уже в ближайшем будущем. По отдельным материалам (РЗЭ, РМ, никель, кобальт, графит и т.д.) проведен более детальный анализ технологических тенденций, перспектив потребления в условиях масштабного спроса на них со стороны новых динамично развивающихся сфер экономической деятельности Индустрии 4.0. Представлены последние инициативы и программы, предпринимаемые за рубежом (США, Китай, ЕС, Япония) для преодоления существующих и будущих вызовов, связанных с развитием высокотехнологичных производств стратегических и критических минералов и веществ. Акцентируется внимание на проблемы и особенности производства в России дефицитных для новой индустрии минералов и веществ. Кратко описываются опыт и компетенции в области разработки и производства критически важных минералов и материалов предприятиями Госкорпорации «Росатом». В заключении представлены выводы и рекомендации по возможному развитию данного технологического направления на перспективу как в России, так и за рубежом. Аналитический отчет подготовлен в рамках Плана деятельности отраслевого Центра аналитических исследований и разработок (ЦАИР) на 2021 г. (п. 3.4.8).

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:**

Индустрия 4.0, критически важные минералы и материалы, особо чистые вещества, редкоземельные элементы, никель, кобальт, литий, графит, рассеянные редкие металлы.

**ЦИТИРОВАНИЕ:**

Критически важные минералы и материалы для индустрии 4.0: особенности получения и перспективы применения на глобальных рынках. / Мансуров О.А., Птицын П.Б. – М.: ЦАИР, частное учреждение «Наука и инновации», 2022. – 142 с. – Рус. – Деп. 28.04.2022, № 15-В2022.

**TITLE:**

Critical minerals and materials for Industry 4.0: specifics of manufacturing and application prospects at global markets.

**AUTHORS:**

**Mansurov O.A., Ptitsyn P.B.**, Centre of Analytical R&D (CARD), Private Enterprise “Science and Innovations”, State Atomic Energy Corporation Rosatom.

**REVIEWERS:**

**Ivanovskikh K.V.**, Giredmet JSC.

**ABSTRACT:**

The report gives an overview and analysis of the current status of critical minerals and materials applied to advance industries of a new technological pattern. Ongoing processes in the world economics in terms of technological development and their influence on the mineral-source base in the near future are described. More detail analysis of the technology tendencies, prospects of consumption of specific materials (REE, rare scattered metals, nickel, cobalt, graphite, etc.) by new dynamically developing spheres of economic activity of Industry 4.0 are provided. The latest initiatives and programs undertaken in a number of countries (USA, China, EC, Japan) in order to overcome current and future challenges associated with the development of hi-tech production of strategic and critical minerals and compounds are discussed. A particular attention is given to complications and specifics of production of minerals and compounds that are currently deficient in Russia for new industry development.

Experience and competences are concisely described in the field of development and manufacturing of critical minerals and materials by organizations of State Corporation Rosatom. In conclusion findings and recommendations are provided with regard to the development of this technological direction both in Russia and abroad.

This report was prepared as a part of the Action Plan for 2021 of the Centre of Analytical R&D (CARD).

**KEYWORDS:**

Industry 4.0, critical minerals and materials, highly pure substances, rare earth metals, nickel, cobalt, lithium, graphite, rare scattered elements.

# СОДЕРЖАНИЕ

---

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	5
<b>1. ИНДУСТРИЯ 4.0 И ЕЕ СВЯЗЬ С КВММ</b> .....	11
<b>2. СТРАТЕГИЧЕСКИЕ И КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫЕ МИНЕРАЛЫ И МАТЕРИАЛЫ: ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ТЕНДЕНЦИИ</b> .....	17
<b>3. РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ</b> .....	33
<b>3.1. Сферы потребления и перспективы развития рынка РЗЭ</b> .....	33
<b>3.2. Особенности получения и переработки РЗЭ</b> .....	40
<b>3.3. РЗЭ в передовых производствах нового технологического уклада</b> .....	48
<b>3.3.1. Скандий и иттрий</b> .....	48
<b>3.3.2. Легкие РЗЭ (LREE)</b> .....	52
<b>3.3.3. Тяжелые РЗЭ (HREE)</b> .....	56
<b>4. НИКЕЛЬ, КОБАЛЬТ И ЛИТИЙ</b> .....	57
<b>5. ГРАФИТ</b> .....	67
<b>6. РЕДКИЕ И РАССЕЯННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ОСОБО ЧИСТЫЕ ВЕЩЕСТВА ДЛЯ ТЕХНОЛОГИЙ 4-Й ПРОМЫШЛЕННОЙ РЕВОЛЮЦИИ</b> .....	73
<b>6.1. Высокочистые/особо чистые вещества</b> .....	73
<b>6.2. Группа рассеянных редких металлов</b> .....	83
<b>7. ЗАРУБЕЖНЫЕ ИНИЦИАТИВЫ И ПРОГРАММЫ, СВЯЗАННЫЕ С РАЗВИТИЕМ ПРОИЗВОДСТВА КВММ</b> .....	89
<b>8. ПРОБЛЕМЫ И ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА КВММ В РОССИИ</b> .....	101
<b>9. ИМЕЮЩИЙСЯ ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ В ОБЛАСТИ КВММ В ГОСКОРПОРАЦИИ «РОСАТОМ»</b> .....	109
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b> .....	117
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b> .....	122
<b>ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ</b> .....	132
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b> .....	134



## ВВЕДЕНИЕ

---

В конце 2000-х – начале 2010-х годов в большинстве развитых стран потенциал дальнейшего роста производительности в условиях существующего экономического и технологического уклада оказался близок к исчерпанию. Темпы роста производительности в развитых странах начали снижаться еще в 1980-е годы. Начиная с 2011 года значения данного показателя колеблются в границах, не превышающих 1–2% в год. Особенно серьезно сократился рост производительности в обрабатывающей промышленности, которая выступает системным заказчиком и потребителем продукции инновационно-технологических отраслей. Фактически речь идет о том, что традиционные технологии производства в большинстве секторов приблизились к пределу производительности, за которым отдача инвестиций и эффективность резко падают. Ситуация конкуренции для западных стран усугубляется тем, что в последние десятилетия

развивающиеся экономики (прежде всего Китай, Индия) смогли создать собственный внутренний рынок, причем не только не уступающий по своим объемам, но и демонстрирующий растущий спрос на сложные технологические продукты и решения, а, соответственно, и материалы. К примеру, в 1980–2018 гг. наиболее высоким темпом экономического роста отличался Азиатско-Тихоокеанский регион, где ВВП (в долл. США 2010 г.) увеличивался в среднем на 4,5% в год по сравнению с 2,7% в Северной Америке и 1,9% в странах ЕС.

«Взрывное» развитие и распространение новых технологий, их проникновение во все сферы человеческой деятельности приводят сегодня к быстрым и глубоким изменениям глобальных рынков, структуры и характера современного промышленного производства, экономики и социальной сферы, серьезным изменениям в области производства и потребления минерально-сырьевых материалов (МС-материалов).

Глобализация мировой экономики и научно-технический прогресс интенсифицируют и расширяют спектр применения различных МС-материалов – необходимой основы создания производств множества видов высокотехнологичной продукции. Передовые страны-производители этой продукции (США, ЕС, Китай, Япония и др.) остро нуждаются в различных видах дефицитного минерального сырья и высокочистых материалах, являющихся «критическими» для их экономик.

Прогнозируется, что потребление многих видов «критических» материалов и минерального сырья в обозримой перспективе будет резко увеличиваться, отражая не только рост многих ведущих экономик мира (США, Китай, ЕС, Индия и др.), но и появление новейших технологий, зачастую требующих все возрастающие количества веществ и материалов с новыми уникальными характеристиками (например, особо чистые или с заданными свойствами).

Так, мировой спрос на литий и графит – два наиболее важных материала для аккумуляторов электромобилей – по экспертным оценкам, может вырасти более чем на 4000 процентов к 2040 году в сценарии, если мир будет ориентирован на строгое соблюдение своих климатических целей, при этом потребление графита, по прогнозам, может увеличиться почти на 2500 процентов.

В разных по темпам трансформации мировой энергетики сценариях в генерацию ВИЭ до 2050 года, по экспертным оценкам, будет инвестировано от 12 до 22 трлн долл. США, что, в свою очередь, станет драйвером для рынка различных накопителей энергии на основе существующих конструкций литий-ионных батарей, а далее – более совершенных ком-

пактных аккумулирующих систем с иными характеристиками и рабочими материалами. Уже к 2030 году мировой спрос в этом сегменте вырастет более чем в 10 раз в основном за счет электротранспорта, углеродный след которого по мере роста доступности «зеленой» энергии будет быстро снижаться.

Развитие беспилотного автомобилестроения, быстрое распространение парка беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) во всем мире приводит к широкомасштабному внедрению технологий получения и обработки информации об удаленных объектах с помощью лидаров, в основе которых лежат довольно высокомоощные лазерные устройства на основе GaAs. Переход на связь стандарта 5G, наблюдаемый в настоящее время, налагает более высокие требования к характеристикам используемых в оборудовании материалов. Пропускная способность каналов 5G обещает возрасти до 20 Гбит/с, в этой связи традиционные кремниевые транзисторы LDMOS не могут «покорить» новые частоты, и их работа в данных условиях окажется малоэффективной. Выходом является разработка и коммерциализация совершенно новых, обладающих уникальными свойствами материалов – например, с использованием GaN. Ожидается, что к 2024 году к сетям 5G будет подключено свыше 1,5 млрд человек. Острая конкурентная борьба, развернувшаяся в последние годы, прежде всего, между американскими и китайскими компаниями за лидерство на рынке 5G связи лишь предопределяет другую технологическую гонку в недалеком будущем – создание беспроводной сети 6G. Являясь преемником сетей 5G, она перейдет от персонализированной связи к полной реализации парадигмы IoT, соединяя не только людей, но и автономные транспортные средства, роботизированные агенты и вычислительные ресурсы. При этом за счет внедрения совершенно уникальных по свойствам материалов (на основе того же графена) новая мобильная сеть сможет поддерживать скорость 1 Тбит/с.

Благодаря достижениям в области фундаментальных и прикладных наук в мире и низким ценам на редкоземельную продукцию в последнее время стремительно росло ее потребление в различных отраслях мировой экономики. За последние 10 лет мировой рынок РЗЭ увеличился более чем в несколько раз в натуральном выражении – с 80 тыс. тонн в 2000 году до более чем 230 тыс. тонн в настоящее время.

За последние несколько десятилетий Китай, обладая одной из крупнейших в мире минерально-сырьевой базой, создал и динамично развил у себя большинство производственно-технологических цепочек, связанных с освоением, переработкой и введением в промышленный оборот добы-



ваемого минерального сырья. При этом речь идет не только про ее добычу и первичную переработку в концентраты, но и про производство высокочистых материалов и веществ, а также создание целых отраслей по выпуску новой высокотехнологичной продукции на их основе. Лидерство Китая сегодня проявляется по большинству выпускаемых в мире «критических» минерально-сырьевых материалов – РЗЭ, РМ, ЭПГ, графит, никель, марганец, сурьма, галлий, индий и т.д. При этом производство МС-материалов (в среднем рост 10% в год), прежде всего неметаллических и рудных полезных ископаемых, направлено на удовлетворение собственных потребностей быстро развивающейся экономики Китая (по объему ВВП – вторая экономика в мире после США) и только потом на экспорт.

Западные экономики (прежде всего США, ЕС) в последние годы стремятся выйти из-под зависимости от поставок МС-материалов из Китая, воссоздавая собственные производственные возможности за счет внедрения новых технологий переработки материалов и развивая локальные технологические цепочки «производство – потребление».

Например, в 2010 году США находились в 100%-ной зависимости от зарубежных поставок по 18 видам и более чем в 50%-ной зависимости еще по 43 видам минерального сырья. Импорт осуществлялся прежде всего из Китая, Бразилии, Канады, Франции, Германии, Японии, Мексики, России и Венесуэлы. Эти цифры иллюстрируют еще одну проблему, связанную с высокой региональной концентрацией минерально-сырьевых ресурсов, – зачастую залежи многих МС-материалов размещаются в ограниченных странах мира (кобальт – ДР Конго, ниобий – Бразилия, палладий – Россия, РЗЭ – Китай, Канада и т.д.).

На государственном уровне в США, ЕС, Японии, Канаде принимаются правительственные программы поддержки горнорудной и перерабатывающих отраслей промышленности, формируются отраслевые альянсы и консорциумы, в рамках проектов государственно-частного партнерства выделяются значительные инвестиции на воссоздание/развитие минерально-сырьевых комплексов и запуск современных производств по переработке «критических» материалов. Зарубежный подход к решению проблем производства критически важных минералов и материалов (КВММ) характеризуется высоким долевым участием государства в финансировании соответствующих программ развития. Госфинансирование в Канаде составляет 35–40%, в США – 50–70%, в Японии – 75–80% от общих инвестиций, направляемых в настоящее время в горнодобывающую промышленность.

Одновременно на ситуацию влияют пандемия COVID-19 и проистекающие торговые войны между двумя крупнейшими экономиками мира – США и Китаем (последний аспект связан в первую очередь с борьбой двух стран за гегемонию на мировой арене и нередко вовлекает в торговые споры и материально-сырьевые ресурсы). В результате цены на многие КВММ (включая РЗЭ) в период 2020–2021 гг. взлетели на десятки %, что в конечном счете ударило по многим отраслям промышленности – электронике, автомобилестроению, машиностроению и т.д.

В последние 15–20 лет довольно высокие темпы роста экономики России были обусловлены прежде всего расширением участия страны в мировых сырьевых и энергетических рынках. В настоящее время возможности экономического роста страны за счет этих факторов в основном исчерпаны. Сегодня доля России на мировых рынках продукции с использованием перспективных производственных технологий не превышает 0,6%. Исключение – рынок ядерных технологий, где Россия – лидер с долей 16,7% мирового рынка, а также рынок вооружений, где Россия входит в первую тройку крупнейших экспортеров (около 20% мирового рынка). Доля России в мировом экспорте продукции передового производства в 2002–2018 гг. варьировалась в пределах 0,2–0,5%, а в мировом импорте – в пределах 0,3–1,6%. К примеру, в 2020 году российский рынок производства полупроводниковых материалов и оборудования достиг примерно 2,7–3 млрд долл. США, что составляет порядка 0,7% мирового рынка. Для сравнения: объем рынка производства полупроводниковых материалов в США за 2020 год составил 95,4 млрд долл. США, в Японии – 36,5 млрд долл. США, в Китае – 151,5 млрд долл. США. Следует признать, что Россия остается малозаметным участником глобального рынка передовых производственных технологий и, более того, рискует «отстать навсегда» от технологических лидеров. Разрыв в экономическом развитии влечет за собой и низкие темпы освоения в стране новых сырьевых источников МС-материалов, а также незначительный спрос на технологии их переработки и малые объемы промышленного производства на их основе.

После распада СССР, так как производственные мощности минерального сырья находились уже в разных странах (Россия, Казахстан, Украина, Эстония, Белоруссия), производственно-технологическая цепочка, состоящая из добычи, обогащения, переработки и разделения, потребления и утилизации, фактически распалась – многие ее элементы или прекратили свое существование, или были приватизированы и стали самостоятельными бизнес-структурами. Со временем, проиграв конку-

ренцию с зарубежными производителями КВММ, прежде всего из Китая, они, за редким исключением, окончательно исчезли с технологической карты стран-наследниц СССР.

Например, несмотря на то, что в настоящее время Россия располагает крупной редкоземельной сырьевой базой, производство индивидуальных РЗЭ в России составляет всего лишь доли % от мирового объема производства (при этом сама переработка коллективного карбоната РЗЭ осуществляется за пределами страны). Ситуацию усугубляет низкий внутренний спрос на РЗЭ из-за слабого отечественного производства конечной высокотехнологичной продукции (электроника, оптика, производство специальных керамики и сплавов, постоянных магнитов, электромобилей, ветрогенераторов и т.д.).

В данном аналитическом отчете рассматриваются различные аспекты воздействия происходящих ныне процессов в мировой экономике (Индустрия 4.0, «новая промышленная революция») на материально-сырьевую базу, в ближайшем будущем и на перспективу. Поднимается проблематика критически важных минералов и материалов (КВММ), которые все в большей мере используются в зарождающихся индустриях и спрос на которые в предстоящие годы со стороны новых динамично развивающихся сфер экономической деятельности будет только стремительно расти, тем самым создавая вызовы в части их достаточности на рынке, разработки технологий получения веществ с особыми качествами и свойствами.

В отношении отдельных КВММ (РЗЭ, РМ, никель, кобальт, графит и т.д.) проведен более детальный анализ происходящих технологических тенденций, перспектив их потребления с учетом описанных выше процессов.

Кроме того, дается оценка перспектив в области производства КВММ у организаций, входящих в контур управления Госкорпорации «Росатом» (прежде всего научно-технологический блок), анализируется их потенциальная роль в деле формирования материаловедческой платформы нового поколения.

С полными версиями аналитических отчетов отраслевого Центра аналитических исследований и разработок можно ознакомиться на следующих ресурсах:

1. Портал отраслевого Центра аналитических исследований и разработок (доступ осуществляется через внутреннюю сеть КСПД Росатома)



2. Раздел отраслевого Центра аналитических исследований и разработок на портале «Страна Росатом» (доступ осуществляется через внутреннюю сеть КСПД Росатома)

