

ПОСТОЯННЫЕ НЕОДИМОВЫЕ МАГНИТЫ В РОССИЙСКОЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКЕ

© 2023 г. В. А. Крюков^{а,*}, О. В. Жданеев^{б,**}, В. А. Яценко^{а,***}, К. Н. Фролов^{б,****}

^аИнститут экономики и организации промышленного производства СО РАН, Новосибирск, Россия

^бРоссийское энергетическое агентство Министерства энергетики РФ, Москва, Россия

*E-mail: valkryukov@mail.ru

**E-mail: Zhdaneev@rosenergo.gov.ru

***E-mail: yva@ieie.nsc.ru

****E-mail: Frolov@rosenergo.gov.ru

Поступила в редакцию 15.02.2023 г.

После доработки 10.04.2023 г.

Принята к публикации 30.04.2023 г.

Статья посвящена проблемам ветроэнергетики в России. Один из ключевых вопросов развития ветроэнергетики в нашей стране — бесперебойное снабжение производителей ветрогенераторов постоянными неодимовыми магнитами и сырьём для их изготовления. После распада СССР в стране сохранилось небольшое количество предприятий, обладающих необходимыми компетенциями и технологическим оборудованием для производства магнитов на основе редкоземельных металлов (РЗМ). Однако проблема состоит в том, что Россия не располагает полной цепочкой производства до уровня оксидов, а также индивидуальных редкоземельных элементов и сплавов на их основе. Все постоянные магниты на основе РЗМ импортируются, а перебои с поставками негативно сказываются на работе высокотехнологичных компаний, а также предприятий ТЭК и военно-промышленного комплекса. Авторы статьи анализируют потребность ветроэнергетики страны в постоянных неодимовых магнитах, полный цикл выпуска которых может стать одним из стимулов восстановления цепочки производства РЗМ и продукции на их основе.

Ключевые слова: постоянные неодимовые магниты, редкоземельные металлы, ветроэнергетические установки, топливно-энергетический комплекс, возобновляемые источники энергии, производственная цепочка.

DOI: 10.31857/S0869587323050067, EDN: VWFBVAV

Топливо-энергетический комплекс (ТЭК) — система, которая объединяет разные отрасли, связанные с добычей и производством первичных энергетических ресурсов, переработкой их в другие виды топлива и виды энергии, а также транспортировкой и распределением между потребителями. Эта система обеспечивает промышленность и население всеми видами энергии и пополняет бюджет страны за счёт экспорта углеводородов. Функциональное их применение — не

КРЮКОВ Валерий Анатольевич — академик РАН, директор ИЭОПП СО РАН. ЖДАНЕЕВ Олег Валерьевич — кандидат физико-математических наук, заместитель генерального директора РЭА Минэнерго России. ЯЦЕНКО Виктор Анатольевич — кандидат экономических наук, старший научный сотрудник ИОПП СО РАН. ФРОЛОВ Константин Николаевич — директор проекта Центра компетенций технологического развития ТЭК РЭА Минэнерго России.

только инструмент внутренней и внешней политики, но и один из показателей технологического развития страны. ТЭК России занимает второе место в мире (после США) по производству энергетических ресурсов и третье — по их внутреннему потреблению (после США и Китая).

Глобальная энергетическая система находится сегодня в процессе перехода к “чистой” энергетике, определённого рамками Парижского соглашения по климату 2015 г. [1]. Главная его цель — удержание прироста глобальной средней температуры в пределах 1.5–2°C сверх доиндустриальных уровней, что обязывает страны и компании существенно снизить выбросы парниковых газов за счёт новых технологий производства тепло- и электроэнергии. Появление этих технологий меняет структуру потребления минерально-сырьевых ресурсов (МСР). На первое место выходят такие важнейшие химические элементы, как медь,

никель, литий, кобальт и, конечно, редкоземельные металлы (РЗМ)¹, поскольку постоянные магниты на их основе становятся ключом перехода к чистой и возобновляемой энергетике. Они используются в электрических машинах ветрогенераторов, гибридных и электромобилях, производство которых ежегодно растёт. Развитие глобальной энергетической системы в новых условиях требует пересмотра подходов к цепочкам производства и поставок ключевых полезных ископаемых. Независимость этих поставок от внешней конъюнктуры – один из важнейших вопросов национальной безопасности.

С сожалением приходится констатировать, что в настоящее время производство полного цикла до уровня оксидов, индивидуальных РЗМ и сплавов на их основе в России отсутствует, хотя наша страна располагает одной из самых крупных редкоземельных минерально-сырьевых баз [2]. Сегодня в мире отчётливо прослеживается глобальная тенденция: темпы освоения новых источников минерально-сырьевых ресурсов и объёмы необходимых инвестиций для перехода к новой энергетической системе не соответствуют ускоряющемуся темпу производства такой высокотехнологичной продукции, как солнечные батареи, ветроэнергетические установки (ВЭУ) и электромобили. Это связано с тем, что многие ключевые ресурсы (особенно РЗМ) поступают от небольшого числа производителей, сконцентрированных всего в нескольких странах.

В нашей работе представлен анализ цепочки производства неодимовых магнитов и электрических машин на их основе, которые необходимы для развития ветроэнергетики в России. Главный вопрос: будут ли редкоземельные минерально-сырьевые ресурсы стимулирующим фактором перехода к новой энергетической системе в нашей стране или они станут “узким горлышком” в этом процессе?

Глобальная возобновляемая энергетика. С конца XIX в. самым распространённым методом получения электричества в промышленных масштабах служит процесс вращения турбины генератора мощным потоком горячего пара. И неважно, ка-

кая это электростанция – атомная или тепловая, принцип её работы уже более века остаётся неизменным независимо от вида топлива и количества контуров в системе передачи тепла [3]. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ) расширяют и дополняют возможности привычного подхода. Например, концентрационные (гелиотермальные) технологии² основаны на том же принципе, только вместо сжигания углеводородного сырья и управления ядерной реакцией используется сбор солнечной энергии в относительно небольшой точке (приёмнике) благодаря специальным зеркалам (гелиостатам). Для выработки электроэнергии солнечно-тепловая энергия с приёмника передаётся на паровую турбину, подключённую к генератору. Аналогичный принцип и у геотермальных технологий, нашедших применение ещё в начале XX в.

Сегодня появляются и другие технологии производства электроэнергии, не связанные с нагревом теплоносителя и дальнейшей передачей его энергии на турбину генератора. Они позволяют напрямую получать электричество от энергии солнца или ветра, благодаря чему их можно использовать в районах с низким уровнем транспортной доступности, территориальной удалённости от промышленных центров и крупных населённых пунктов. Новые технологии могли бы расширить возможности бесперебойного энергетического обеспечения населения, например Арктической зоны, уменьшив зависимость от поставок топлива из других регионов России. К таким технологиям можно отнести фотогальванические (фотоэлектрические) панели³ и ветрогенераторы, которые сегодня стремительно совершенствуются и уже лидируют среди ВИЭ по установленным мощностям и объёму генерируемой энергии (рис. 1)^{4,5}.

SPV-технологии основаны на преобразовании солнечной энергии в электрическую с помощью специализированных панелей (фотоэлектрических преобразователей), состоящих из двух слоёв

² Concentrated solar power (CSP).

³ Solar photovoltaic, или solar PV (SPV).

⁴ Другие источники производства электроэнергии: из водорода и аммиака, гелиоконцентраторы, геотермальные, приливные станции, аккумуляторные батареи.

⁵ В отчёте “The World Energy Outlook-2021” рассматриваются следующие основные сценарии (они не являются точными прогнозами) [4]: сценарий 1 предполагает, что обязательства по сокращению выбросов CO₂ к 2050 г. будут выполнены правительствами всего мира частично; по сценарию 2 эти обязательства к 2050 г. будут выполнены правительствами всего мира полностью, в том числе на национальном уровне; сценарий 3 соответствует сценарию 2, причём страны с развитой экономикой достигают нулевого уровня выбросов к 2050 г., Китай – к 2060 г., а остальные страны – самое позднее к 2070 г.; сценарий 4 соответствует ключевым целям развития, провозглашённым ООН, – достижению нулевых выбросов CO₂ к 2050 г. и доступу населения всех стран мира к электроэнергии к 2030 г.

¹ Редкоземельные элементы (РЗЭ), или редкоземельные металлы (РЗМ), представляют собой группу из 15 лантаноидов, имеющих в таблице Менделеева порядковые номера с 57 по 71 (лантан, церий, празеодим, неодим, прометий, самарий, европий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций), а также иттрий, иногда скандий (порядковые номера, соответственно, 39 и 21). РЗМ разделяют на три группы по их атомному весу: лёгкие (La, Ce, Pr, Nd), средние (Sm, Eu, Gd) и тяжёлые (Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y). В зарубежной литературе РЗМ часто делят на две группы: лёгкие (La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu) и тяжёлые (Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Y). С учётом 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).

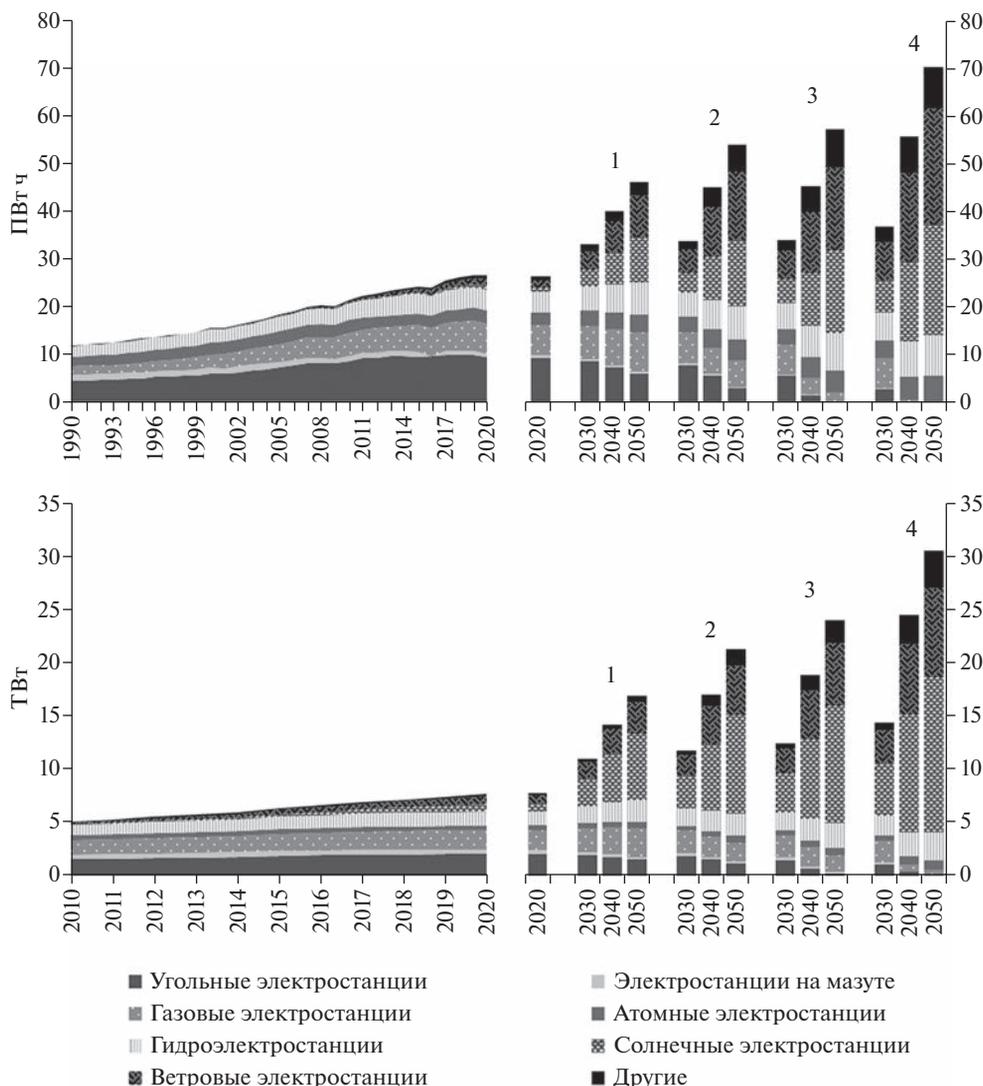


Рис. 1. Производство электроэнергии в мире за 1990–2020 гг. (вверху слева), объём установленной мощности за период 2010–2020 гг. (внизу слева) и сценарии прогноза согласно данным МАЭ до 2050 г. (справа)

Источники: диаграммы подготовлены на основе [4].

полупроводниковых материалов (часто в виде монокристаллического или поликристаллического кремния, с КПД до 17.5% и 15% соответственно). Согласно данным Международного энергетического агентства (МЭА), на конец 2020 г. суммарная мощность всех установленных SPV-панелей достигла 739 ГВт. Прогнозируется, что к концу текущего десятилетия общая установленная мощность SPV-панелей в мире может вырасти более чем в 3 раза — до 2550 ГВт [4].

Другой наиболее доступный возобновляемый источник энергии — преобразование кинетической энергии ветра в электрическую с помощью генераторов. По данным МЭА, за последние 10 лет объём установленной мощности ВЭУ в мире увеличился в 4 раза, достигнув 737 ГВт в конце 2020 г. Однако уже к 2030 г. ожидается удвоение номи-

нальной мощности до 1600 ГВт, что составит более 25% общего прироста установленной мощности по всем источникам производства электроэнергии [4]. Согласно прогнозу МЭА, 80% прироста установленной мощности в течение следующих 10 лет дадут ветро- и солнечная энергетика (см. рис. 1).

В настоящее время большая часть ветроэлектростанций (ВЭС) сосредоточена в Китае (30%), Европе (32%) и Соединённых Штатах (21%). Перспективно развитие ветроэнергетики в странах Юго-Восточной Азии, Латинской Америки и Ближнего Востока. Благодаря значительной территории, разнообразным погодноклиматическим условиям и протяжённому континентальному шельфу высокий потенциал развития солнечной и ветроэнергетики имеет и Россия. Опыт

европейских стран показал, что размещение ВЭУ на шельфе даёт ряд экономических и эксплуатационных преимуществ. Поскольку морской ветер имеет более высокую мощность и стабильность, нежели береговой, то возможно строительство более эффективных ВЭУ за счёт установки самых мощных генераторов из существующих [5].

Совместно с ветроэлектростанциями на шельфе можно использовать и морские приливные, которые способны преобразовывать энергию океанических волнений и течений в электроэнергию. Причём технологии, связанные с использованием энергии океана, отличаются не только высокой предсказуемостью, но и возможностью достижения большей удельной мощности, поэтому пригодны для непрерывного энергоснабжения потребителей [6].

Неодимовые магниты для ветроэнергетики. С развитием технологий размеры ВЭУ и мощности генераторов растут, а материалоемкость снижается. Эффект масштаба ведёт к сокращению издержек, что повышает конкурентоспособность ВЭУ в сравнении с другими технологиями производства электроэнергии. Например, в турбине мощностью 3.45 МВт содержится примерно на 15% меньше бетона, на 50% – стекловолокна, на 50% – меди и на 60% – алюминия, чем в турбине мощностью 2 МВт [7]. Однако стремительно растущий рынок генераторов существенно повышает спрос на постоянные неодимовые магниты, для производства которых требуются редкоземельные металлы, в частности неодим, празеодим, диспрозий и тербий.

Архитектура ВЭУ (а с ней и тип генератора) выбирается с учётом географического расположения и погоднo-климатических условий. Скорость ветра – переменная величина, поэтому необходима синхронизация частоты вращения ротора с лопастями и с частотой электрической сети. Для того чтобы ветроэнергетическая установка работала эффективно и обеспечивала высокое качество напряжения при неоптимальных скоростях ветра (повышенная скорость может приводить к аварийным режимам работы ВЭУ), используют различные подходы и конструктивные решения [8, 9]: устанавливают коробку передач между ротором с лопастями (их угол атаки можно менять) и генератором, тормоз на валу; в зависимости от типа ВЭУ применяют синхронные или асинхронные машины, силовые преобразователи соответствующих топологий.

Типы топологий силовых преобразователей и электрических машин. Первое поколение мощных ВЭУ (от 100 кВт) создавалось на основе асинхронных машин с фазным ротором и преобразователем частоты соответствующего диапазона. Такая архитектура получила широкое распространение, поскольку относительно недорога и

проста в реализации. Кроме того, преобразователь обрабатывает только часть (20–30%) общей мощности, поэтому данный тип отличается более низкими потерями. Недостаток этой архитектуры – ограниченный диапазон управления скоростью вращения ротора, что приводит к значительным колебаниям выходной мощности, а также к увеличенной нагрузке на электрические и механические компоненты, отражающейся на стоимости технического обслуживания. Существуют два подхода к реализации этой топологии – либо асинхронный генератор с фазным ротором с регулируемым скольжением, либо с двойным питанием.

Технологический прорыв в полупроводниковой промышленности и производстве постоянных магнитов, произошедший во второй половине XX в., позволил построить новую архитектуру ВЭУ, которая даёт возможность использовать FRC⁶-преобразователи как с асинхронными, так и синхронными машинами. В последнем случае могут применяться разные роторы, в том числе фазные и с постоянными магнитами в зависимости от типа возбуждения. Конфигурация FRC позволяет управлять скоростью вращения ротора в широком диапазоне и контролировать активную и реактивную мощность, однако стоимость преобразователей и потери мощности на них выше. Кроме того, в многополюсных синхронных машинах исключена коробка передач.

В настоящее время можно выделить четыре основные топологии электрических машин, на основе которых собираются современные ВЭУ⁷:

- асинхронный генератор двойного питания с коробкой передач (GB-DFIG),
- синхронный генератор с постоянными магнитами с коробкой передач (GB-PMSG),
- синхронный генератор с постоянными магнитами без коробки передач (DD-PMSG),
- синхронный генератор с электрическим возбуждением (с фазным ротором) без коробки передач (DD-EESG).

Следует учитывать, что топология силовых преобразователей и электрических машин зависит от размещения ВЭУ. Так, на суше сегодня доминирует топология GB-DFIG, на её долю приходится более 70% мирового рынка. Топология DD-PMSG удвоила свою долю за 10 лет, заняв в 2020 г. около 20% рынка, при этом на шельфе она доминирует с долей около 60% мирового рынка [10]. Такую закономерность можно объяснить

⁶ Fully rated converters (преобразователь частоты полного диапазона).

⁷ Gearbox double-fed induction generator (GB-DFIG), gearbox permanent-magnet synchronous generator (GB-PMSG), direct-drive permanent-magnet synchronous generator (DD-PMSG), direct-drive electrically excited synchronous generator (DD-EESG).

тем, что для шельфовых ВЭУ требуются более мощные турбины с высоким КПД. При этом очевидное преимущество конфигурации DD-PMSG проявляется в более низкой стоимости технического обслуживания. Главные недостатки такой архитектуры — высокая стоимость синхронного генератора с постоянными неодимовыми магнитами и использование большого количества меди в подводных коллекторах и кабелях, связывающих ВЭУ с трансформаторными и преобразовательными (если присутствует передача постоянного тока) подстанциями [11]. Однако преимущества конфигурации GB-PMSG позволяют делать прогнозы, согласно которым ВЭУ с такой архитектурой увеличат долю на рынке ВЭС до 95% на шельфе и до 40% на суше к 2040 г. В таком случае спрос на неодим и празеодим может увеличиться более чем в 3 раза [7, 10].

Вместе с тем растущий спрос на ключевые редкоземельные элементы (неодим, празеодим, диспрозий и тербий) со стороны таких высокотехнологичных областей промышленности, как производство цифровой и бытовой электроники, роботизированного технологического оборудования и автомобилестроение, в сочетании с ускоряющимся ростом цен и стремительно меняющейся геополитической конъюнктурой, вероятно, вынудят инвесторов выбирать альтернативные конфигурации ВЭУ [2, 10, 12, 13]. Например, в новых проектах строительства ВЭС на шельфе может использоваться архитектура GB-PMSG, а на суше — DD-EESG с меньшим количеством постоянных неодимовых магнитов.

Постоянные неодимовые магниты. В 1980-х годах корпорациями Джeneral Моторс (США) и Сумитомо Спешиал Металс (Япония) независимо друг от друга было получено соединение неодим-железо-бор ($Nd_2-Fe_{14}-B$), магнитная индукция которого сегодня превышает 1.4 тесла (для сравнения: ферриты — 0.5, альнико — 0.7, самарий-кобальтовые магниты — 1 тесла). Благодаря этому свойству неодимовый магнит может удерживать массу в 1300 раз превышающую его собственную [14]. В результате сегодня доля рынка постоянных неодимовых магнитов составляет около 95%, значительно расширяется их технологическое присутствие в электронике, автомобильной промышленности, ветроэнергетике. Поскольку электрические машины, изготовленные на основе неодимовых магнитов, значительно меньше и легче, они более эффективны по энергопотреблению.

Существуют два способа производства постоянных неодимовых магнитов: первый, наиболее распространённый, — спекание методом классической порошковой металлургии, второй, используемый реже, — формирование магнита на основе быстрого отверждения полимера с помо-

щью прессования или литья под давлением. Полученные заготовки подвергаются термообработке, формовке и намагничиванию. Кроме того, мировой опыт показывает, что сегодня разработка и производство новых типов высококачественных сплавов, в том числе магнитных, часто определяются требованиями заказчика, то есть появляется тенденция к индивидуализации производства [14–16].

В зависимости от различных условий эксплуатации неодимовые магниты защищают от коррозии с помощью дополнительных покрытий из никеля, цинка, олова, золота или эпоксидной смолы. Чистое соединение $Nd-Fe-B$ начинает терять свою магнитную силу уже при нагреве чуть выше $80^\circ C$, поэтому в него добавляют диспрозий (до 5%), который значительно увеличивает предел рабочей температуры (существуют неодимовые магниты, используемые при температурах около $200^\circ C$). Однако одновременно с увеличением предела рабочей температуры диспрозий снижает намагниченность соединения. В этом плане легирование тербием было бы предпочтительным, поскольку он оказывает более существенное влияние на коэрцитивную силу с меньшим ухудшением намагниченности, но объёмы производства тербия значительно ниже диспрозия [14–16].

В современной автомобильной промышленности для производства гибридных электромобилей требуются бесщёточные электродвигатели постоянного тока с постоянными неодимовыми магнитами (PMDC⁸). Для такого типа двигателей используют высокоэффективные магниты следующего состава: $Nd_{31\%}-Dy_{4.5\%}-Co_{2\%}-Fe_{61.5\%}-B_{1\%}$ (где индекс — процент по массе в соединении). Для двигателя мощностью 55 кВт требуется порядка 0.65 кг сплава $Nd-Dy-Co-Fe-B$, что соответствует 200 г неодима (3.6 г/кВт) и 30 г диспрозия (0.55 г/кВт) на двигатель [2, 10, 14, 17].

Ветряные турбины с прямым приводом (GB-PMSG) содержат 700–1200 кг постоянных неодимовых магнитов на 1 МВт, что соответствует 175–420 кг чистого неодима на 1 МВт. При этом в соединениях таких магнитов не присутствует диспрозий (в отличие от генераторов электромобилей), поскольку температуры в ветряной турбине не поднимаются высоко, а для охлаждения достаточно нагоняемого воздуха [7, 10, 14, 17].

Следует отметить, что новым быстро растущим рынком для постоянных неодимовых магнитов становятся индивидуальные средства мобильности: электрические самокаты и велосипеды. Для них необходимы лёгкие и компактные электродвигатели, требующие небольшого объёма магнитного материала — порядка 350 или 86 г неодима на каждое устройство [14]. Однако ги-

⁸ Permanent magnet direct current.

Таблица 1. Производство электроэнергии по странам за 2020 г. (первый столбец), рост (второй столбец) и совокупный среднегодовой темп роста (третий столбец) за период 2010–2020 гг.

Страна	Общее производство электроэнергии			Возобновляемые источники энергии			Ветроэнергетика			Солнечная энергетика		
	2020	2010–2020		2020	2010–2020		2020	2010–2020		2020	2010–2020	
	ТВт·ч	ТВт·ч	%	ТВт·ч	ТВт·ч	%	ТВт·ч	ТВт·ч	%	ТВт·ч	ТВт·ч	%
Китай	7787	3551	5.7	2222	1431	9.8	471	426	23.8	270	269	66.4
Индия	1609	637	4.7	360	200	7.7	68	48	11.8	64	63.9	79.9
Япония	1003	–161	–1.3	234	119	6.7	8	4	6.5	79	75	31.2
США	4243	–111	–0.6	842	390	4.4	340	245	10.0	117	114	18.0
ЕС	2757	–200	–0.6	1082	410	4.4	398	258	10.0	142	119	18.0
Бразилия	605	89	1.5	515	78	1.5	57	55	35.6	8	8	48.9
Россия	1057	21	0.2	195	25	1.3	1	1	81.7*	2	2	92.2**
Всего	26762	5244	2.0	7593	3342	5.4	1595	1253	15.0	833	801	34.5

* За период 2015–2020 гг.

** За период 2014–2020 гг.

гантский спрос на электросамокаты и велосипеды спровоцировал рождение большого количества компаний-производителей и, соответственно, возросшую потребность в неодимовых магнитах.

По разным оценкам, производство постоянных неодимовых магнитов сегодня составляет 60–80 тыс. т, причём более 90% выпуска магнитных сплавов сосредоточено в Китае [2, 17–20]. В то же время рост потребления неодимовых магнитов прогнозируется на уровень 7–10% ежегодно, в результате спрос может приблизиться к отметке 200 тыс. т к 2040 г. [14, 17, 20, 21]. Поскольку такой рост потребления, вероятно, не будет удовлетворён производителями, ожидается дефицит и повышение цен на часть РЗМ, например, на неодим, диспрозий и празеодим. В этой связи в развитых странах ведутся исследования и поиск новых технологий, направленных на уменьшение и замещение дорогостоящих РЗМ, переработку производственных и потребительских отходов. Кроме того, идёт поиск технологий производства магнитных материалов, для которых вообще не требуются редкоземельные металлы, например, из сплавов железа и никеля (тетратаенит) и других соединений [22, 23].

Ветроэнергетика России. За период 2010–2020 гг. среднегодовой темп роста⁹ выработки электроэнергии в мире составил 2%, возобновляемых источников энергии – 5.4%, ветроэнергетика показала рост 15%, солнечная энергетика – 34.5%. Эти показатели свидетельствуют о том, что измене-

⁹ Здесь и далее приводятся совокупные среднегодовые темпы роста.

ния в структуре глобальной энергетической системы происходят главным образом за счёт ускоренного развития ветро- и солнечной энергетике. Так, в 2010 г. производство электроэнергии этими отраслями составляло 342 ТВт·ч и 32 ТВт·ч соответственно, а в 2020 г. – 1595 ТВт·ч и 833 ТВт·ч (табл. 1).

Отдельного внимания заслуживает китайская энергетическая программа, благодаря которой производство электроэнергии в этой стране выросло с 2010 г. по 2020 г. почти в 2 раза (с помощью ветра – в 10 раз, солнца – в 270 раз). Также можно отметить значительный рост выработки электроэнергии в Индии, в том числе за счёт возобновляемых источников энергии (см. табл. 1).

В России среднегодовой темп роста производства электроэнергии существенно ниже мировых, а ветро- и солнечная энергетика достигли показателей только 1 ТВт·ч и 2 ТВт·ч в 2019–2020 гг. Как упоминалось, Россия обладает колоссальным потенциалом развития этих отраслей. Территория страны составляет 17.1 млн км², что немного меньше целого континента – Южной Америки (17.8 млн км²), площадь континентального шельфа – более 6 млн км². Кроме того, страна хорошо обеспечена необходимыми минерально-сырьевыми запасами [24]. Однако после распада СССР цепочки производства полного цикла были разрушены, поэтому многие виды товаров для высокотехнологичной промышленности Россия последние три десятилетия вынуждена импортировать, в том числе для производства ветроэнергетических установок. Во многих отраслях утрачен интеллектуальный потенциал в лице спе-

циалистов, прошедших научную и производственную школы, утеряны технологии, специализированное оборудование и возможности их эффективного создания. Однако несмотря на эти негативные процессы, за последние два десятилетия в России появились предприятия, освоившие технологии производства солнечных панелей и ВЭУ. Сегодня российские солнечные панели¹⁰ составляют серьёзную конкуренцию мировым брендам, в том числе американским, европейским и китайским, поскольку они существенно превосходят их по ряду технических и эксплуатационных параметров при более низкой цене. В результате ряд отечественных производителей солнечных панелей экспортирует свою продукцию в страны Евразии и Азиатско-Тихоокеанского региона.

Первая крупная ВЭС с генераторами от 2.5 МВт появилась в России только в 2017 г. (не считая Останинской ВЭС в Республике Крым, эксплуатация которой началась в 2014 г.) – Ульяновская ВЭС-1 (Ульяновская область) с номинальной мощностью 35 МВт. К концу 2021 г. в стране введена в эксплуатацию ещё 21 ВЭС с общей номинальной мощностью 1.9 ГВт (табл. 2). 94% установленных мощностей в России в настоящее время принадлежат всего трём инвесторам: Фонд развития ветроэнергетики¹¹ (54.4%, 280 ВЭУ), АО “НоваВинд”¹² (35.2%, 288 ВЭУ) и ПАО “Энел Россия”¹³ (4.4%, 26 ВЭУ) [25].

Впечатляющие показатели объёмов ввода генерации на основе ВЭУ стали возможными благодаря механизму поддержки на оптовом рынке электроэнергии и мощности России [26, 27]. В рамках этой поддержки проводятся конкурсные отборы проектов ВИЭ, и с инвесторами-победителями заключаются договоры о предоставлении мощности квалифицированных генерирующих объектов, функционирующих на основе

использования возобновляемых источников энергии. Согласно программе, предполагаемый объём конкурентного отбора мощности составит примерно 3.4 ГВт к 2024 г. (табл. 3). Уже формируются параметры программы поддержки ветроэнергетики на период 2025–2035 гг., согласно которой конкурсный отбор мощности составит порядка 43.8 ГВт [28].

На наш взгляд, существует большая вероятность того, что базовыми компаниями, формирующими предложение в конкурентный отбор мощности по средствам ВЭС, останутся ФВР, АО “НоваВинд” и ПАО “Энел Россия”, поскольку эти участники рынка смогли локализовать производство многих основных элементов ВЭУ в России: лопастей, гондол, ступиц, башен, композитных материалов, мощных генераторов от 2.5 МВт, трансформаторов, конвертеров и других компонентов и систем. Немаловажную роль в этом процессе сыграл первый государственный нормативный документ – Распоряжение Правительства РФ от 24.10.2020 № 2749-р “О внесении изменений в распоряжение Правительства РФ от 08.01.2009 № 1-р”, который регламентирует правила рынка и нормы локализации [29]. В результате на российском ветроэнергетическом рынке будет представлен модельный ряд, перечисленный в таблице 4. Распределение по количеству введённых в эксплуатацию установок к 2024 г. (к 2027 г.) ожидается следующим: Vestas V126 – 43% (50%), LP2 L100-2.5 – 47% (43%) и SGRE G3.4-132 – 10% (7%) [25, 28]. Следовательно на российском рынке будут применяться всего две топологии генераторов: асинхронные двойного питания с коробкой передач (GB-DFIG) и синхронные с постоянными магнитами без коробки передач (DD-PMSG).

Сегодня в мире около 70% действующих наземных ВЭУ соответствуют топологии GB-DFIG и только 20% – DD-PMSG. На шельфе иная картина: более 90% – PMSG, из которых более 75% с прямым приводом, и около 10% – GB-DFIG [8–10]. Как упоминалось выше, выбор в пользу топологии PMSG на шельфе связан с более эффективной работой и низкими затратами на техническое обслуживание, несмотря на высокую стоимость производства. Существует большая вероятность того, что в будущем доля ВЭУ с топологией PMSG будет расти как на суше, так и на шельфе, полностью вытеснив топологию DFIG с морей.

Однако генераторам с топологией PMSG необходимы постоянные магниты на основе соединения неодим-железо-бор ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$), в которое могут входить другие редкоземельные металлы для производства сплавов с определяемыми техническими свойствами, например, празеодим, диспрозий или тербий. Особенно остро этот вопрос стоит для турбин с прямым приводом (без

¹⁰Производство солнечных батарей в России налажено в НПП “Квант” (Москва), ЗАО “Телеком-СТВ” (Зеленоград), ООО “Хевел” (Новочёбоксарск), АО “РЗМКП” (Рязань), завод “Сатурн”, ООО “Юнисолэкс” (Краснодар) и др.

¹¹Фонд развития ветроэнергетики создан на паритетной основе АО “Роснано” и ПАО “Фортум” в целях инвестирования в строительство ветропарков и запуска ветроэнергетических проектов. Управляет фондом ООО УК “Ветроэнергетика”.

¹²АО “НоваВинд” – дивизион ГК “Росатом”, основная задача которого консолидировать усилия госкорпорации в передовых сегментах и технологических платформах электроэнергетики, в том числе ветроэнергетике. Совместное предприятие компании АО “НоваВинд” и голландского технологического партнёра Lagerwey Systems B.V. (дочерняя компания немецкого ветроэнергетического гиганта Enercon GmbH) – Red Wind B.V. локализовало производство ВЭУ в России на основе турбин, разработанных Lagerwey Systems B.V.

¹³ПАО “Энел Россия” – генерирующая компания, обеспечивающая электро- и теплоснабжение промышленных предприятий и бытовых потребителей.

Таблица 2. ВЭС (с ВЭУ от 2.5 МВт), эксплуатируемые в России, на конец 2021 г. (без Останинской ВЭС)

Название	Мощность ВЭС, МВт	Кол-во ВЭУ, шт.	Модель (марка/мощность, МВт)		Собственник	Расположение
Сулинская ВЭС	98.8	26	VESTAS V-126 – Н87	3.8	ФРВ	Ростовская область
Каменская	98.8	26	VESTAS V-126 – Н87	3.8	ФРВ	Ростовская область
Гуковская ВЭС	98.8	26	VESTAS V-126 – Н87	3.8	ФРВ	Ростовская область
Казачья ВЭС-1	50.4	12	VESTAS V-126 – Н87	4.2	ФРВ	Ростовская область
Казачья ВЭС-2	50.4	12	VESTAS V-126 – Н87	4.2	ФРВ	Ростовская область
Азовская ВЭС	90.1	26	SG 3.4-132	3.5	ПАО “Энел Россия”	Ростовская область
Марченковская ВЭС	120	48	LP2 L100-2.5	2.5	АО “НоваВинд”	Ростовская область
Целинская ВЭС	100.8	24	VESTAS V-126 – Н87	4.2	ФРВ	Республика Калмыкия
Салынская ВЭС	100.8	24	VESTAS V-126 – Н87	4.2	ФРВ	Республика Калмыкия
Ульяновская ВЭС-1	35	14	LP2 L100-2.5	2.5	ФРВ	Ульяновская область
Ульяновская ВЭС-2	50.4	14	VESTAS V-126 – Н87	3.6	ФРВ	Ульяновская область
Кочубеевская ВЭС	210	84	LP2 L100-2.5	2.5	АО “НоваВинд”	Ставропольский край
Кармалиновская ВЭС	60	24	LP2 L100-2.5	2.5	АО “НоваВинд”	Ставропольский край
Бондаревская ВЭС	120	48	LP2 L100-2.5	2.5	АО “НоваВинд”	Ставропольский край
Медвеженская ВЭС	60	24	LP2 L100-2.5	2.5	АО “НоваВинд”	Ставропольский край
Адыгейская ВЭС	150	60	LP2 L100-2.5	2.5	АО “НоваВинд”	Республика Адыгея
Холмская ВЭС	88.2	21	VESTAS V-126 – Н87	4.2	ФРВ	Астраханская область
Излучная ВЭС	88.2	21	VESTAS V-126 – Н87	4.2	ФРВ	Астраханская область
Манланская ВЭС	75.6	18	VESTAS V-126 – Н87	4.2	ФРВ	Астраханская область
Черноярская ВЭС	37.8	9	VESTAS V-126 – Н87	4.2	ФРВ	Астраханская область
Старицкая ВЭС	50.4	12	VESTAS V-126 – Н87	4.2	ФРВ	Астраханская область
Котовская ВЭС	88.2	21	VESTAS V-126 – Н87	4.2	ФРВ	Волгоградская область
Другие	120.7	768				
Итого	2043.4	1362				

Источник: составлено на основе [25].

Таблица 3. Установленная мощность объектов ВИЭ, отобранных по результатам КОМ ВЭС за период 2014–2020 гг., МВт

Компания	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Итого
ФРВ	–	–	35	–	50	298.8	250	476.8	250	497.7	–	1858.3
НоваВинд	–	–	–	–	150	210	300	60	280	35	157.5	1192.5
Энел Россия	–	–	–	–	–	–	90.09	–	200.97	–	71.25	362.31
Прочие	–	–	–	15	–	–	–	–	–	–	–	15
План	–	51	50	200	400	500	500	500	500	500	214.7	3415.7
Факт	–	–	35	15	200	508.8	640.09	536.8	730.97	532.7	228.75	3428.11

Таблица 4. Модельный ряд ВЭУ мощностью от 2.5 МВт, установленных в России на конец 2021 г.

Модель	Производитель	Установленная мощность, МВт	Тип топологии
Vestas V126	ООО “Вестас Рус”	3.6/3.8/4.2	GB-DFIG
LP2 L100-2.5	АО “НоваВинд”	2.5	DD-PMSG
SGRE G3.4-132	ООО “Сименс Гамеса Рэньюэбл Энерджи”	3.4	GB-DFIG

коробки передач), поскольку для их выпуска необходимо в среднем по миру порядка 240 кг/МВт РЗМ (неодим – 75%, празеодим – 14%, диспрозий – 7% и тербий – около 4%). В то же время для турбин с топологией GB-PMSG требуется всего около 60 кг/МВт, а для топологии GB-DFIG – менее 15 кг/МВт [10]. Например, для ветрогенератора LP2 L100-2.5 нужно порядка 8.3 тыс. постоянных неодимовых магнитов общим весом около 3.3 т. Это означает, что потребность компании АО “НоваВинд” в магнитах данного типа в 2022–2024 гг. составит порядка 600–700 т и примерно столько же в 2025–2027 гг. ООО “Вестас Рус” и ООО “Сименс Гамеса Рэньюэбл Энерджи” к 2027 г. потребуются не более 50 т магнитов для производства электрических машин. При этом в России лишь небольшое количество компаний обладают необходимыми компетенциями и технологическим оборудованием для производства постоянных неодимовых магнитов (по нашим оценкам, объём производства составляет не более 200 т в год). Основная проблема заключается в том, что страна не располагает полной цепочкой производства редкоземельной продукции, поэтому всё сырьё для производства магнитов импортируется. В результате российские высокотехнологичные предприятия, а также предприятия ТЭК и военно-промышленного комплекса зависят от импорта редкоземельного сырья (в основном из Китая).

Такая ситуация в российской промышленности вынуждает крупные государственные компании, обладающие необходимыми научно-техно-

логическими компетенциями, поэтапно локализовать производство постоянных магнитов (неодимовых, самарий-кобальтовых и иных) для ключевых потребителей. Так, в рамках контракта между компаниями ООО “Элемаш Магнит”¹⁴ и Red Wind B.V. планируется создать производство постоянных магнитов полного цикла. Холдинг “Росэлектроника”, входящий в структуру ГК “Ростех”, также обладает необходимыми компетенциями для производства редкоземельных магнитов на базе АО “Спецмагнит” и АО НПП “Исток” им. А.И. Шокина.

Согласно разным оценкам, спрос на редкоземельные металлы в мире к 2030 г. достигнет 277–297 тыс., к 2040 г. – 373.2–443.7 тыс. т, на магнитные материалы – 96.3–106.2 тыс. т и 128.8–164.1 тыс. т соответственно [10, 17, 20]. При этом спрос на магнитные материалы для ВИЭ составит 17–32% (для генераторов ВЭУ – порядка 6–11%) общего объёма в зависимости от сценария развития высокотехнологичных отраслей промышленности и энергетики (табл. 5).

Россия на протяжении нескольких десятилетий ежегодно импортирует порядка 2–3 тыс. т редкоземельной продукции для производства катализаторов, магнитов, электроники, оптики, керамики и других товаров с высокой добавленной стоимостью. Если развитие ветроэнергетики бу-

¹⁴Дочернее предприятие ПАО “Ковровский механический завод”, входящее в компанию “ТВЭЛ” ГК “Росатом”; специализируется на изготовлении наукоёмкой и технически сложной продукции.

Таблица 5. Прогноз спроса на РЗМ и магнитные материалы до 2040 г., тыс. т

Мировой спрос на РЗМ	2020	2030	2040
Общий объём	190.2–198.7	277–297	373.2–443.7
в том числе на магнитные материалы	63.8–66.1	96.3–106.2	128.8–164.1
в том числе для ВИЭ	6.4	18.9–34.2	21.8–46.6
неодим	5.0	14.8–26.9	17.1–36.7
другие РЗМ	1.4	4.1–7.3	4.7–9.9
в том числе для ВЭС	4.1	8.1–11.2	8.1–12
неодим	3.1	6.1–8.5	6.1–9
другие РЗМ	1	2–2.7	2–3

дет проходить в рамках упоминавшихся программ, то ежегодно потребуются не более 100 т РЗМ для производства постоянных неодимовых магнитов – весьма скромный показатель по сравнению с общемировыми потребностями.

Повышенный спрос на редкоземельные материалы со стороны высокотехнологичных производств, вероятно, будет приводить к конкуренции и, как следствие, дефициту некоторых РЗМ. При этом на месторождениях добытая руда полностью перерабатывается на первых этапах обогащения в концентрат без остатков и не селективно. Такое “естественное связывание” приводит к избыточному предложению части РЗМ. В результате на дефицитные РЗМ цены будут расти, а на избыточные – падать, к тому же ограничиваются возможности инвестирования в новые редкоземельные источники сырья с низкой стоимостью “корзины” добываемых элементов [30].

Важно отметить, что товарный рынок редкоземельных металлов – один из самых молодых в мире, который растёт впечатляющими темпами по сравнению с другими рынками на базовые металлы (никель, медь, железо, золото и др.). По мере развития научно-технологического прогресса раскрывается потенциал РЗМ, появляется новая продукция, позволяющая диверсифицировать потребление редкоземельных металлов. Например, одной из прорывных технологий будущего может стать использование ветроэнергетических установок с высокотемпературными сверхпроводниками, которые позволят значительно увеличить мощность ВЭУ, снизив при этом их массу и стоимость. В настоящее время технология проходит этап прототипирования, исследований и разработок. Несмотря на высокий потенциал, ВЭУ с высокотемпературными сверхпроводниками – гипотетический продукт следующих десятилетий.

Темпы развития отечественной ветро- и солнечной генерации электроэнергии в последние

годы возрастают. Если они сохранятся, то будут происходить существенные изменения в структуре энергетической системы России. Им надо придать плавную траекторию, чтобы все участники цепочек производства и рынка могли адаптироваться к новым условиям. При этом нельзя забывать про традиционные источники генерации, поскольку необходимо модернизировать устаревшее оборудование на ТЭС, ГЭС, АЭС, увеличивать пропускную способность электрических сетей, а вследствие увеличения доли ВИЭ в структуре энергобаланса повышать устойчивость и надёжность энергосистемы.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена по плану научно-исследовательских работ Института экономики и организации промышленного производства Сибирского отделения РАН, проект 5.6.3.2 (0260-2021-0004) “Ресурсные территории Востока России и Арктической зоны: особенности процессов взаимодействия и обеспечения взаимосвязности региональных экономик в условиях современных научно-технологических и социальных вызовов”.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Жданев О.В., Зуев С.С.* Вызовы для энергосектора России до 2035 года // Энергетическая политика. 2020. № 3. С. 12–23. https://doi.org/10.46920/2409-5516_2020_3145_12
2. *Крюков В.А., Яценко В.А., Крюков Я.В.* Редкоземельная промышленность – реализовать имеющиеся возможности // Горная промышленность. 2020. № 5. С. 68–84. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2020-5-68-84>
3. *Жданев О.В., Бравков П.В., Дурдыева А.А. и др.* Вопросы технической политики отраслей ТЭК России / Под ред. О.В. Жданеева. М.: Наука, 2020.
4. World Energy Outlook 2021 // International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021> (дата обращения 11.01.2023).
5. *Таровик В.И., Вальдман Н.А., Труб М.С., Озерова Л.Л.* Развитие морских электростанций, использующих возобновляемые источники энергии // Арктика: экология и экономика. 2013. № 2. С. 34–47.

6. Шельфовые возобновляемые источники энергии для “синей экономики” // International Renewable Energy Agency. https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Dec/IRENA_Offshore_Renewables_2020_RU.pdf (дата обращения 22.02.2022).
7. *Elia A. et al.* Wind turbine cost reduction: A detailed bottom-up analysis of innovation drivers // *Energy Policy*. 2020. V. 147. P. 111912. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.111912>
8. Review of Power Converters for Wind Energy Systems. https://www.researchgate.net/publication/274305497_Review_of_Power_Converters_for_Wind_Energy_Systems (дата обращения 15.02.2022).
9. *Крыльцов С.Б., Пудкова Т.В.* Обзор современных топологий силовой части ветрогенераторов большой мощности // Современные научные исследования и инновации. 2016. № 12. С. 124–129. <https://web.snauka.ru/issues/2016/12/75301> (дата обращения 22.06.2022)
10. The role of critical minerals in clean energy transitions [Electronic resource] // International Energy Agency (IEA). <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions> (дата обращения 11.04.2022).
11. *Белей В.Ф., Задорожный А.О.* Ветроэнергетика России: анализ состояния и перспективы развития // Энергия: экономика, техника, экология. 2018. № 7. С. 19–29. <http://gas.jes.su/energy/s2079878400005380-1> (дата обращения 30.06.2022). <https://doi.org/10.31857/S023336190001293-8>
12. *Яценко В.А., Самсонов Н.Ю., Крюков Я.В.* Опционный подход к экономической оценке проектов разработки редкоземельных месторождений // Мир экономики и управления. 2018. № 4. С. 69–84. <https://doi.org/10.25205/2542-0429-2018-18-4-69-84>
13. Electric Vehicle Market by Vehicle (Passenger Cars & Commercial Vehicles), Vehicle Class (Mid-priced & Luxury), Propulsion (BEV, PHEV & FCEV), EV Sales (OEMs/Models) Charging Station (Normal & Super) & Region – Global Forecast to 2030 // MarketsandMarkets Research Private Ltd. <https://www.marketsandmarkets.com/MarketsandMarkets-v3719/Electric-Vehicle-Passenger-Cars-Commercial-12500583/> (дата обращения 12.05.2023).
14. *Binnemans K., Jones P.T., Müller T. et al.* Rare Earths and the Balance Problem: How to Deal with Changing Markets? // *J. Sustain. Metall.* 2018. № 4. P. 126–146. <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0162-8>
15. *Менушенков В.П.* Структурные превращения и коэрцитивная сила в сплавах для постоянных магнитов. Ч. 2. Спечённые сплавы на основе Sm-Co и Nd-Fe-B // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № S1. С. 163–178.
16. *Король В.И., Ланкин И.М., Ланкин М.В.* Обзор российских производителей постоянных магнитов из магнитотвёрдых материалов // Вестник молодёжной науки России. 2020. № 5. С. 12.
17. *Alonso E. et al.* Evaluating Rare Earth Element Availability: A Case with Revolutionary Demand from Clean Technologies 2012. <https://doi.org/10.1021/es203518d>
18. Achieving American Leadership in the Rare Earth Magnets Supply Chain // The U.S. Department of Energy (DOE). <https://www.energy.gov/sites/default/files/2022-02/Neodymium%20Magnets%20Supply%20Chain%20Fact%20Sheet%20Final.pdf> (дата обращения 12.03.2023).
19. Rare Earth Magnets and Motors: A European Call for Action // The European Institute of Innovation & Technology (EIT). https://eit.europa.eu/sites/default/files/2021_09-24_ree_cluster_report2.pdf (дата обращения 04.02.2023).
20. *Яценко В.А., Лебедева М.Е.* Прогноз динамики спроса на мировом рынке редкоземельных металлов // Мир экономики и управления. 2021. № 4. С. 124–145. <https://doi.org/10.25205/2542-0429-2021-21-4-124-145>
21. Supply and Demand // Arafura Resources. <https://www.arultd.com/products/supply-and-demand.html> (дата обращения 12.05.2023).
22. *Ivanov Y.P. et al.* Direct Formation of Hard-Magnetic Tetrataenite in Bulk Alloy Castings // *Adv. Sci.* John Wiley & Sons, Ltd. 2023. V. 10. № 1. P. 2204315.
23. *Perlepe P. et al.* Metal-organic magnets with large coercivity and ordering temperatures up to 242°C // *Science*. 2020. V. 370. P. 587–592.
24. Государственный доклад “О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2019 году”. http://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovani_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovani_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii (дата обращения 21.02.2022).
25. Ветроэнергетика // Российская Ассоциация Ветроиндустрии. <https://rawi.ru/windpower> (дата обращения 05.02.2022).
26. Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии. Распоряжение Правительства РФ от 8 января 2009 г. № 1-п. <http://government.ru/docs/20503> (дата обращения 15.03.2022).
27. Постановление Правительства РФ от 28 мая 2013 г. № 449 “О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности”. <https://base.garant.ru/70388616> (дата обращения 15.03.2022).
28. *Каланов А.Б.* Программа поддержки ВИЭ на период 2025–2035 гг. // Российский союз промышленников и предпринимателей. Презентация. <http://media.rspp.ru/document/1/2/5/2502ae1262d70e4e020677e29ad60c23.pdf> (дата обращения 19.03.2022).
29. Распоряжение Правительства РФ от 24.10.2020 № 2749-р “О внесении изменений в распоряжение Правительства РФ от 08.01.2009 N 1-п”. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_366158 (дата обращения 15.03.2022).
30. *Binnemans K., Jones P.T.* Rare Earths and the Balance Problem // *Journal Sustainable Metallurgy*. 2015. № 1. P. 29–38. <https://doi.org/10.1007/s40831-014-0005-1>