

## ЭКОНОМИКА ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 338.2+339.9

*М. Пашке, И. Б. Сергеев, О. Ю. Лебедева*

### ОБЕСПЕЧЕНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ МЕТАЛЛАМИ «ЗЕЛЕННОЙ» ЭНЕРГЕТИКИ В КОНТЕКСТЕ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Целью данного исследования является анализ ключевых проблем обеспечения редкоземельными металлами альтернативной энергетики как одного из динамично развивающихся секторов мировой экономики. Тема является актуальной, поскольку надежность ресурсного обеспечения «зеленой» энергетики зависит не только от внешнеэкономической политики Китая, но и от возможностей монопольного поставщика справляться с экологическими проблемами, нарастание которых ставит под сомнение жизнеспособность идей устойчивого развития в мировом масштабе. Потребность альтернативной энергетики в ресурсах оценивалась с учетом прогнозной структуры производства и потребления энергии в мире, а перспективы надежного обеспечения потребителей критически важным сырьем — на основании анализа сырьевой базы и возможностей стран по производству редкоземельных металлов. Проблема загрязнения окружающей среды рассмотрена в работе с учетом торгово-экономических и правовых аспектов ресурсного обеспечения европейской энергетики сырьем. В качестве вариантов смягчения существующих проблем предложены экономические, технологические и экологические инструменты, которые в совокупности с механизмами международных двусторонних

---

**Мариан ПАШКЕ** — доктор юридических наук, Почетный доктор наук (Dr. H. C.), профессор, Университет г. Гамбурга, Институт права, Германия, 20148, г. Гамбург, ул. Rothenbaumchaussee, д. 33; marian.paschke@jura.uni-hamburg.de

**Игорь Борисович СЕРГЕЕВ** — доктор экономических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», Российская Федерация, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21-я линия, д. 2; si.spb@mail.ru

**Олеся Юрьевна ЛЕБЕДЕВА** — кандидат экономических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет», Российская Федерация, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21-я линия, д. 2; ole\_spmi@mail.ru

**Marian PASCHKE** — Doctor of Law, Honorary doctor of Sciences (Dr. H. C.), Professor, University of Hamburg, Institute of law, Rothenbaumchaussee, 33, Hamburg, 20148, Germany; marian.paschke@jura.uni-hamburg.de

**Igor B. SERGEEV** — Doctor of Economics, Professor, Saint Petersburg Mining University, 21 line Vasilievsky island, 2, Saint-Petersburg, 199106, Russian Federation; si.spb@mail.ru

**Olesya Y. LEBEDEVA** — PhD of Economics, Saint Petersburg Mining University, 21 line Vasilievsky island, 2, Saint-Petersburg, 199106, Russian Federation; ole\_spmi@mail.ru

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2016

и многосторонних соглашений позволят рассчитывать на успех в решении глобальной проблемы обеспечения редкоземельными элементами «зеленой» энергетики в контексте устойчивого развития. Библиогр. 43 назв. Ил. 2. Табл. 1.

*Ключевые слова:* редкоземельные металлы, «зеленая энергетика», сырьевая база, устойчивое развитие, критические виды сырья, загрязнение окружающей среды, надежность поставок.

*Marian Paschke, Igor B. Sergeev, Olesya Y. Lebedeva*

#### THE SUPPLY OF RARE EARTHS FOR “GREEN” ENERGY AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT

The paper investigates key issues related to alternative energy provision with the rare earth metals. The problem is essential for the energy sector as one of the most intensively developing sectors of the world economy, since the reliability of resource supply depends heavily both on China's foreign trade policy and the ability of the monopoly supplier to cope with environmental problems. Fast growth of the latter questions the viability of sustainable development ideas on a global scale. In the paper, the resources needed for alternative energy were estimated taking into account the target structure of world energy production and consumption. The prospects for reliable supply of consumers with critical raw materials were analyzed on the basis of countries' resources and production capacities. The investigation of the environmental pollution problem comprised consideration of ecological, trade and economic, as well as some legal aspects of providing European “green energy” with critical raw materials. Some economic, technological and environmental measures were offered, which together with the mechanisms of international bilateral and multilateral agreements will allow progress to be made in addressing the global problem — providing “green energy” with rare earth elements in the context of sustainable development. Refs 43. Figs 2. Table 1.

*Keywords:* rare earth metals, “green” energy, raw mineral base, sustainable development, critical raw materials, environmental pollution, reliable supply.

### Введение

Идея о возможности развития экономики, при котором рост благосостояния людей не сопровождался бы непременным усилением нагрузки на окружающую среду, истощением ресурсной базы и ухудшением условий жизни будущих поколений, появилась в 70-е годы XX в. и оформилась в концепцию устойчивого развития к началу 1990-х годов. За десятилетия своего существования данная концепция, основанная на взаимодействии трех аспектов: экономического, социального и экологического — получила убедительное научное обоснование, была признана на мировом уровне [Сергеев, Лапочкина, 2009]. Это выражается как в появлении новых подходов к теоретическому построению моделей устойчивого роста и поиску методов управления ими, так и в расширении спектра выдвигаемых целей и решаемых задач. По результатам прошедшей в 2015 г. 70-й сессии Генеральной ассамблеи ООН были приняты Цели устойчивого развития на последующие 15 лет до 2030 г. Перечень их расширился с 7 до 17 наименований, при этом несколько целей напрямую связаны с энергетикой и рациональным использованием природных ресурсов [Преобразование нашего мира..., 2015].

Одной из приоритетных целей устойчивого развития на перспективу следует считать обеспечение «доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех». Утверждение о том, что энергетика и устойчивое развитие должны рассматриваться в едином контексте, по нашему мнению, является оправданным в силу значимости энергетических ресурсов для поддержания экономического роста и непосредственной связи энергетики с проблемой изменения климата [Пленарная дискуссия..., 2012; Бобылев, Захаров, 2012; Зорина, 2015; Порфирьев, 2015; Жигалов, Пахомова, Малышков, 2015].

ООН призывает развивать сотрудничество в сфере исследований и экологически чистых технологий производства энергии, которое явилось бы основой «зеленой» экономики, способствовало созданию препятствий для изменения климата и преодолению последствий, связанных с этим.

Необходимо отметить, что развитие «зеленой» (альтернативной) энергетики имеет два аспекта: с одной стороны, возобновляемую энергетику действительно связывают с щадящим воздействием на состояние атмосферы (по сравнению с производством энергии при использовании традиционных топлив); с другой стороны, интенсивное развитие таких чистых энергетических технологий требует все возрастающего количества невозобновляемых ресурсов — в частности, редкоземельных металлов (РЗМ). Добыча руд РЗМ и производство чистых металлов из них обостряют проблему рационального освоения и эффективного использования природных ресурсов, к которым, несомненно, относятся полезные ископаемые. Укажем несколько обстоятельств, которые определяют актуальность рассматриваемой темы.

Прежде всего, в структуре мирового производства отдельных видов минерального сырья произошли кардинальные изменения, в результате которых усилилась зависимость потребителей от внешнеторговой политики стран-монополистов. Кроме того, усугубились экологические проблемы в странах-поставщиках в связи с интенсивным развитием в них горнодобывающих и перерабатывающих производств. Указанные обстоятельства заставляют задуматься как минимум над двумя вопросами:

1) насколько жизнеспособными являются идеи устойчивого развития в мировом масштабе, а не только применительно к экономически развитым странам Европы и Северной Америки;

2) возможно ли в средне- и долгосрочной перспективе говорить о надежном обеспечении дефицитным сырьем экономически развитых стран, которые не обладают собственной ресурсной базой, обеспечивая экологическую безопасность производства в странах-поставщиках?

Исходя из поставленных вопросов, можно сформулировать цель настоящего исследования: она заключается в уточнении ключевых проблем ресурсного обеспечения высокотехнологичных и динамично развивающихся секторов мировой экономики (проблема «критических материалов»<sup>1</sup>), а также в определении возможных путей урегулирования противоречий, которые возникают в процессе обеспечения дефицитным сырьем альтернативной, или «зеленой», энергетики (проблема устойчивого развития).

Исследование имеет аналитический характер и состоит из трех частей, содержание которых соответствует решаемым в работе задачам. В первом разделе рассмотрено место заявленной проблемы в зарубежных и российских теоретических исследованиях. Второй посвящен оценке потребностей «зеленой» энергетики в ресурсах с учетом прогнозной структуры производства и потребления энергии в мире, а также вопросам развития мирового рынка «критических материалов» и РЗМ. В третьем разделе представлены результаты анализа сырьевой базы редкоземельного производства и производственных возможностей стран, при этом

<sup>1</sup> Под «критическими материалами» понимаются виды сырья, поставки которых подвержены различного рода ограничениям, а их значимость для ведущих отраслей экономики высока.

основное внимание уделено Китаю. Здесь же дается характеристика экологических проблем, которые сопровождают производство редкоземельных элементов в Китае.

### **1. Устойчивое развитие, «зеленая» энергетика и критические материалы: современное состояние проблемы**

Необходимо отметить, что существует значительное количество публикаций российских ученых по вопросам обеспечения устойчивого развития экономики в целом и энергетики в частности. Широкий спектр проблем достижения обществом указанной цели ежегодно обсуждается в рамках международных симпозиумов и конференций (к примеру, «Устойчивое развитие: общество и экономика» в Санкт-Петербургском государственном университете; «ТЭК в XXI веке»).

Ученые делятся результатами исследований и дискутируют по таким вопросам, как поиск моделей устойчивого роста и инновационного развития экономики, роль экономической политики в их обеспечении; управление устойчивым экономическим ростом на национальном, региональном и отраслевом уровнях; взаимосвязь общества и природы, влияние экологических аспектов на экономическую оценку производства; методология устойчивого развития, его современные трактовки [Лякин, 2014; Скотаренко, 2011; Сухина, Ильичева, 2012; Зорина, 2015; Каплунов и др., 2015; Устойчивое развитие: общество и экономика, 2015].

Российскими учеными активно обсуждается тема «зеленой» экономики, сущность которой основана на применении в производственной и энергетической сферах экологически чистых технологий, снижающих экологические риски [Бобылев, Захаров, 2012; Пленарная дискуссия..., 2012; Порфирьев, 2013]. В частности, освещаются проблемы перехода России к новой модели экономики посредством внедрения наилучших доступных технологий, анализируются общераспространенные и специфические барьеры, стоящие на пути экологических инноваций [Пахомова, Малышков, 2015]. Рассматривается роль «зеленых» информационных технологий в данном процессе [Салтан, 2015]. Систематизированы вызовы в отношении России, порождаемые структурной перестройкой мировой энергетики [Порфирьев, 2015].

Несмотря на значительное число научных публикаций по теме устойчивого развития и «зеленой» экономики, имеет место разрыв между теоретическими разработками и их практической реализацией. В действительности существуют проблемы, не позволяющие оценивать нынешнюю экономическую ситуацию как соответствующую экономике нового уклада, содействующей «социальному прогрессу, устойчивому потреблению и производству» [Захарова, 2015].

Важнейшая из них — проблема устойчивого ресурсного обеспечения промышленности экономически развитых стран сырьем, обострившаяся в 2000-е годы в связи с ростом потребления природных ресурсов (в первую очередь минеральных) и существенным изменением мировой «структуры» их производства. Речь идет о стратегически важных видах сырья, потребность в которых из года в год растет, а предложение ограничено. Китай, например, в настоящее время имеет статус монопольного производителя многих видов минерального сырья, жизнен-

но важных для развития высокотехнологичных отраслей экономики европейских стран, США и Японии.

В то же самое время форсированный рост китайской экономики привел к скачку потребности в минеральном сырье на внутреннем рынке, обострив проблему его дефицитности. Китай ввел ряд экспортных ограничений применительно к широко используемым в экономически развитых странах ресурсам [Simandl, 2014; He, 2014]. Для США и стран Европейского союза (ЕС) изменение внешнеторговой политики Китая стало вызовом. Мировое сообщество отреагировало на этот вызов разработкой концептуальных подходов к решению проблемы «критических материалов»: были разработаны стратегии обеспечения нужд потребителей сырьем [The EU Raw Materials Initiative..., 2008; European Innovation Partnership..., 2012]. Масштабные исследования были проведены по идентификации критических его видов в ЕС и США [Critical Materials..., 2011; Knoeri et al., 2013; European Commission..., 2014; Vadenbo et al., 2014]. Ряд исследований, инициированных Европейской комиссией, посвящен изучению критических видов сырья в сфере «зеленой» энергетики [Resnick Institute Report..., 2011; Hoenderdaal, 2013; Tzimas, 2015]. Современная методология количественной оценки степени критичности того или иного вида сырья основана на трехмерном анализе следующих компонентов: 1) риска, сопряженного с поставками сырья (дифференцированного по временному фактору и составляющим); 2) экологических последствий производства и потребления сырья; 3) фактора подверженности поставок различного рода ограничениям [Graedel et al., 2012; Nowakowska, 2012; European Commission..., 2014]. В публикациях последних лет активно обсуждаются и правовые аспекты внешнеторговых споров, возникших вследствие введения Китаем ограничительных мер в отношении экспортируемого им сырья [Massari, 2013; Biedermann, 2014; He, 2014].

Таким образом, в зарубежных и российских публикациях приоритет отдается рассмотрению общих теоретических вопросов устойчивого развития мирового сообщества в настоящем времени и на долгосрочную перспективу. Значительный пласт научных работ посвящен всестороннему изучению технологических, экономических и институциональных условий обеспечения устойчивого развития отдельных стран и регионов на основе перехода их к новой — «зеленой» — модели экономики (и базовой ее отрасли — энергетики). Тема экономической безопасности развитых стран с точки зрения надежности поставок критического сырья потребителям также широко представлена в научных публикациях.

В настоящей статье обе тематики рассматриваются во взаимосвязи, поскольку, по нашему мнению, нуждается в конкретизации потенциальная опасность двойственной ситуации с форсированным развитием «чистых» энергетических технологий в экономически развитых странах и надвигающейся возможной экологической катастрофой, в частности, в китайской Внутренней Монголии, где сконцентрировано основное производство РЗМ, крайне необходимых для «зеленой» энергетики.

Помимо того, целесообразно конкретизировать и дополнить недостаточные проработанные и представленные в литературе аспекты указанных проблем, в частности варианты их решения в виде правовых и экономических инструментов, способных смягчить негативные экологические последствия «ресурсного голода».

## 2. Проблема зависимости промышленности развитых стран и «зеленой» энергетики от редкоземельных металлов

Современный уровень развития обрабатывающей промышленности и энергетики предъявляет более широкий и разнообразный спрос на минеральные ресурсы и повышенные требования к их качеству. Как следствие тенденции последних десятилетий, когда экономически развитые страны переносили опасные в экологическом плане добывающие производства за рубеж, к более богатым месторождениям, возникли сложности с обеспечением стабильных и достаточных по объемам импортных поставок минерального сырья. Стремление Запада к сосредоточению у себя доходных высокотехнологичных перерабатывающих сегментов экономики привело к их зависимости от внешних поставок основных видов энергоресурсов и широкого спектра дефицитного минерального сырья. Это в полной мере коснулось и энергетической отрасли.

Важное место в перечне критических материалов занимают РЗМ. Они и их химические соединения широко используются в разных областях промышленности: в качестве легирующих добавок для сталей и сплавов; как катализаторы при крекинге нефти; для контроля и очищения исходящих газов; при изготовлении сверхмощных постоянных магнитов; в производстве керамики, огнеупорного и оптического стекла; электродов дуговых ламп; сверхпроводниковых и лазерных материалов; высокопрочной стали; высокотемпературных топливных элементов; в ядерной технике [Михайлов, 2010, с. 27]. Очевидно, что основными потребителями РЗМ являются страны с развитым сектором высокотехнологичной обрабатывающей промышленности: «большая семерка» и динамично растущие экономики Юго-Восточной Азии.

Порядка 89% мирового импорта РЗМ приходится на Японию (73%), ЕС (13%) и США (3%). Среди европейских стран наибольшую долю в импорте РЗМ занимают Германия, Эстония и Австрия. Импорт металлов и их сплавов в страны Европейского союза за 2004–2014 гг. существенно сократился (почти на 41%)<sup>2</sup>. Аналогичная тенденция прослеживается и в отношении экспорта сплавов и чистых металлов европейскими странами, в натуральном выражении он сократился на 26% в 2014 г. по сравнению с 2004 г. Такая динамика связана с введением КНР экспортных квот на РЗМ, хаотичным изменением цен на металлы и политикой создания производственных запасов на уровне компаний [He, 2014]. Экспортная квота в отношении РЗМ, установленная Китаем в 2014 г., составляла 31 тыс. т (из них порядка 88% предназначалось для легких редкоземельных металлов и всего 3617 т — для тяжелых)<sup>3</sup>.

Проблема дефицита РЗМ и активные попытки решить ее со стороны отдельных стран привели к некоторой дестабилизации рынка. На протяжении 2000–2009 гг. цены на редкоземельные металлы оставались относительно стабильными, однако в первой половине 2011 г. произошел резкий скачок цен на тяжелые РЗМ. Диспрозий, к примеру, подорожал в 86 раз: с 35 долл. США/кг в мае 2003 до 3500 долл.

<sup>2</sup> Minerals UK. World mineral statistics data. Centre for sustainable minerals development. URL: <http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/wms.cfc?method=searchWMS> (дата обращения: 05.07.2016).

<sup>3</sup> UNCTAD (2014). Commodities at a glance. Special issue on rare earths. № 5. URL: [http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/suc2014d1\\_en.pdf](http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/suc2014d1_en.pdf) (дата обращения: 05.07.2016); USGS (2015) U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2015. URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2015/mcs2015.pdf> (дата обращения: 05.07.2016).



США/кг в декабре 2011 г. [Hoenderdaal, 2013]. Аналогичным образом изменялись цены и на другие тяжелые РЗМ — тербий и европий.

Особенно непростое положение с обеспечением РЗМ сложилось в Европе. Западноевропейские страны практически не имеют собственных месторождений редкоземельных элементов, но, располагая высокотехнологичной промышленностью, испытывают острую потребность в них. Исполнительные органы управления в Евросоюзе в последние годы предпринимают активные попытки найти решение данной проблемы, которая актуализировалась бурным производством оборудования для «зеленой» энергетики: ветрогенераторов; солнечных батарей; гибридных автомобилей и т. п.

Ученые из США признают стратегически важными с точки зрения отсутствия равноценных заменителей в «зеленой» энергетике шесть элементов: диспрозий (применяется в производстве постоянных магнитов для ветровых турбин); неодим (в производстве постоянных магнитов и батарей); иттрий, тербий и европий (в производстве люминофоров); индий (в производстве фотоэлектрических пленок) [Resnick Institute Report, 2011]. В исследованиях европейских авторов, выполненных в 2012–2013 гг., в число критических элементов включен, помимо вышеперечисленных, галлий. Практически полностью обеспечивает текущие потребности стран ЕС в неодиме и диспрозии Китай [Tzimas, 2015]. На его долю приходится также более половины суммарных поставок в Европу индия и графита.

Оценивать потребность европейской энергетики в критически важных видах сырья в долгосрочной перспективе целесообразно, опираясь на прогнозные оценки развития мировой энергетики. Авторы аналитических обзоров *BP Energy Outlook 2016* и *World Energy Outlook 2015 (WEO)* едины во мнении о том, что в будущем потребление энергии в мире возрастет примерно на треть (BP: на 34% за период 2014–2035 гг.; WEO: +33% за период 2013–2040 гг.)<sup>4</sup>.

Ежегодные темпы прироста прогнозируются на уровне 1,4%, в основном за счет роста потребления всех видов энергии в развивающихся странах<sup>5</sup>. Наиболее интенсивно, как ожидается, будет расти спрос на энергию, полученную из возобновляемых источников (+6,6% ежегодно), суммарное приращение спроса на нефть и природный газ останется на уровне прошедшего двадцатилетия (рис. 1).

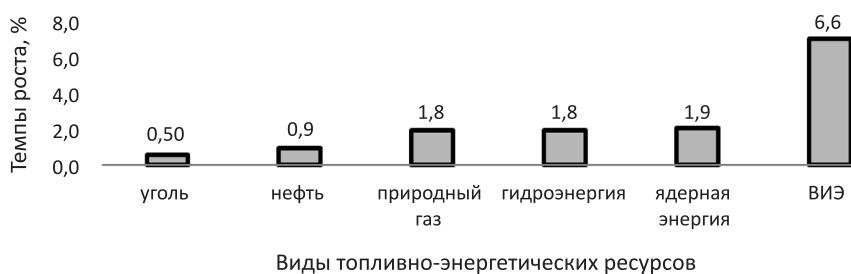


Рис. 1. Среднегодовые темпы роста спроса на различные виды топливно-энергетических ресурсов в 2014–2035 гг., %

Примечание: составлено авторами по данным BP Energy Outlook 2016.

<sup>4</sup> World Energy Outlook 2015. URL: <http://www.worldenergyoutlook.org/weo2015/> (дата обращения: 05.07.2016.); BP Energy Outlook 2016. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2016/bp-energy-outlook-2016.pdf> (дата обращения: 05.07.2016).

<sup>5</sup> BP Energy Outlook 2016... (дата обращения: 05.07.2016).

Соотношение первичных топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в сфере генерации электрической энергии к 2035 г., согласно прогнозам экспертов, изменится: сокращение доли угля будет компенсировано приростом доли природного газа, а также массивным развитием возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Лидирующие позиции в развитии возобновляемой энергетики занимают страны Европейского союза, в которых, по оценкам специалистов, доля ВИЭ в структуре выработки энергии достигнет 35% к 2035 г. (для сравнения: в 2015 г. она оценивалась на уровне 15%). Такое изменение будет возможно при условии сокращения удельных затрат на выработку энергии. По прогнозу ВР, в ближайшие 20 лет ожидаемая величина снижения затрат составит в пределах 25–40% от существующего уровня: по береговым ветрогенераторам — с 73 до 50 долл. США за МВт-ч; по солнечным батареям — со 180 до 80 долл. США за МВт-ч<sup>6</sup>.

Анализ прогнозных величин потребления энергии из возобновляемых источников по регионам позволил сделать следующие выводы:

1) доля ВИЭ в общемировом потреблении энергии к 2035 г. возрастет более чем в три раза; 2) доля потребления энергии, приходящейся на страны Евросоюза, сократится с 12,5 до 8,8%; 3) к 2035 г. объем потребления энергии, полученной за счет ВИЭ, в Европе будет в 2,7 раза превышать уровень 2014 г., в то время как аналогичный показатель в странах Азиатско-Тихоокеанского региона возрастет в 6,5 раз; 4) за счет этого первенство в потреблении ВИЭ перейдет к Азиатско-Тихоокеанскому региону, доля которого изменится с нынешних 30 до 45% к 2035 г. (доля Европы соответственно сократится с 39 до 25%)<sup>7</sup>.

Результаты анализа показывают, что в долгосрочной перспективе преобладающая часть энергии, полученной от возобновляемых источников, будет производиться и потребляться не в европейских странах, как сейчас, а в Азии. Такой прогноз вновь привлекает внимание к проблеме надежного обеспечения стран ЕС сырьем для развития низкоуглеродных энергетических технологий.

Что касается использования «зеленой» энергетикой РЗМ, то при производстве покрытия солнечных батарей применяются индий, галлий, теллур; магнитов ветрогенераторов — диспрозий, неодим, празеодим. Необходимы также РЗМ и при создании магнитов и аккумуляторов гибридных автомобилей, где кроме диспрозия, неодима, празеодима, находят применение лантан, церий и другие металлы. Современный средний ветрогенератор мощностью 2 МВт содержит около 360 кг неодима и 60 кг диспрозия<sup>8</sup>. По оценкам экспертов UNCTAD, к 2020 г. установленная мощность только ветровых электростанций в зависимости от сценария развития возрастет с 238 МВт в 2011 г. до 587–1150 МВт<sup>9</sup>. Сообразно этим планам эксперты оценивают и прогнозную величину потребления РЗМ: ежегодно может потребоваться от 14 до 50 тыс. т оксида диспрозия (по максимальному сценарию); всего же за 40 лет (2010–2050 гг.) суммарная потребность в диспрозии может составить 260–760 тыс. т [Hoenderdaal, 2013]. По оценкам специалистов, к 2030 г. европейским

<sup>6</sup> ВР Energy Outlook 2016... (дата обращения: 05.07.2016).

<sup>7</sup> ВР Energy Outlook 2016... (дата обращения: 05.07.2016).

<sup>8</sup> IER. Big Wind's Dirty Little Secret: Toxic Lakes and Radioactive Waste. Institute for Energy Research (IER), October 2013. URL: <http://instituteforenergyresearch.org/analysis/big-winds-dirty-little-secret-rare-earth-minerals/> (дата обращения: 05.07.2016).

<sup>9</sup> UNCTAD (2014) Commodities at a glance. Special issue on rare earths. № 5. URL: [http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/suc2014d1\\_en.pdf](http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/suc2014d1_en.pdf) (дата обращения: 05.07.2016).



производителям потребуется порядка 6800 т неодима и 3500 т диспрозия в год для развития ветровой энергетики.

Прогнозируемое резкое увеличение спроса на РЗМ может привести к значительным потрясениям рынка. Основными факторами, воздействующими на его равновесие, являются: устойчивое воспроизводство сырьевой базы и действия Китая как фактического монополиста. Сейчас на мировом рынке Китай является поставщиком порядка 90% легких и почти 100% тяжелых редкоземельных элементов.

### 3. Производство редкоземельных металлов в Китае и сопутствующие экологические проблемы

К настоящему времени сформировалась следующая картина мирового производства редкоземельных металлов: в пятерку стран, лидирующих по объему производства концентратов РЗМ (в пересчете на их оксиды), входят Китай (89%), США и Австралия (по 4,5%), Россия (2,0%) и Малайзия (0,2%) [Reichl et al., 2016].

Мировые ресурсы редкоземельных металлов оцениваются в 110–114 млн т, приходятся в основном на пять стран: Китай, Россию, США, Индию и Австралию (рис. 2) [Van Gosen et al., 2014; Brumme, 2014]. Помимо указанных лидеров, запасами и ресурсами РЗМ обладают еще 29 стран, почти половина из них являются странами Азии, 10 — Африки, 6 — Европы (в том числе Гренландия), 1 — Северной Америки (Канада) [Chen Zhanheng, 2011].

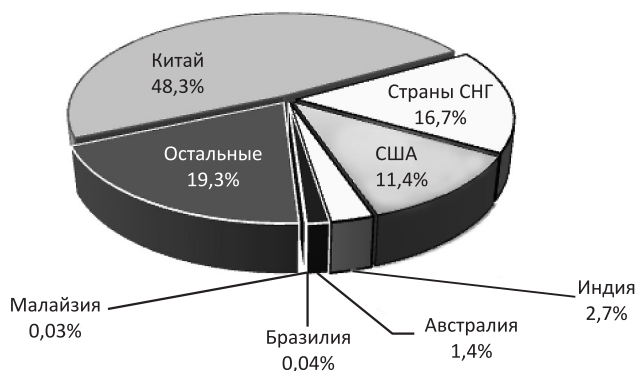


Рис. 2. Распределение мировых запасов РЗМ (в пересчете на их оксиды)

Примечание: составлено авторами по: [Brumme, 2014].

Мировые запасы диспрозия — одного из наиболее дефицитных РЗМ — оцениваются в 1,258 млн т, 72,6% из них находятся в Китае, 10,6% — в странах СНГ, 7,2% — в США; производится диспрозий только в Китае и в России [Hoenderdaal, 2013].

В настоящее время Китай фактически стал монополистом на рынке РЗМ. Он доминирует, вытеснив американских и австралийских производителей и обеспечивая 97% мирового производства данного сырья [Morrison et al., 2012; He, 2014; Biedermann, 2014]. Более того, Китай лидирует и по производству самых сильных постоянных магнитов, обеспечивая 75% мирового объема производства магнитов

«NEO» на основе неодима, железа и бора (NeFeB) и 60% магнитов на основе самария и кобальта (SmCo) [Muller, 2015]. Кардинальные изменения в мировой структуре добычи редкоземельного сырья и получения конечной продукции на его основе произошли за несколько десятков лет.

Следует заметить, что Китай занял сегодняшнее положение монополиста не только по причине наличия крупнейшего месторождения Бауан Обо недалеко от г. Баотоу во Внутренней Монголии. В этой стране на протяжении последних десятилетий ученые интенсивно работали над технологиями производства чистых РЗМ, которые особенно ценны для телекоммуникаций и микроэлектроники. Процесс очищения, разработанный в Китае, настолько продвинутой, что ни одна страна в мире пока еще не способна повторить его. По данным на 2010 г., китайцы могли очищать РЗМ до показателя в 99,9999%, в то время как японцы могли похвастаться коэффициентом очищения в 99,99% [Юрьев, 2015].

На сегодняшний день производство РЗМ оказывает колоссальную нагрузку на экосистемы, где располагаются данные предприятия. Кроме того, форсированное развитие редкоземельной промышленности Китая практически не сопровождалось необходимыми инвестициями в экологическую безопасность используемых технологий. Ежегодно добывающие предприятия Северного Китая сбрасывают без очистки около 10 млн т высококислотных и радиоактивных вод [Massari, 2013], а получение 1 т концентрата РЗМ ведет к образованию примерно такого же количества радиоактивных отходов [Paul, Campbell, 2011].

Как пишет С. Херст, «при производстве каждой тонны редкоземельных металлов в виде отходов остаются 8,5 кг фтора и 13 кг пыли. А использование техники обесфторивания при высоких температурах с применением серной кислоты в обработке РЗМ порождает 9600–12000 кубических метров отработанного газа, в котором содержится пыль, фтороводородная кислота, диоксид серы, серная кислота, а также около 75 кубометров кислотных жидких отходов и примерно тонна радиоактивных отходов» [Hurst, 2010, с. 16]. К 2000-м годам площадь земель, нарушенных деятельностью и отходами горнодобывающих предприятий, достигла 3 млн га, а ежегодный прирост площади таких земель оценивается на уровне 46,7 га [Pan, Li, 2016].

Помимо того, что добыча РЗМ вызывает повышение концентрации тяжелых металлов в почве, часть самих редкоземельных элементов также попадает в окружающую среду, вызывая негативные последствия. Например, анализ содержания РЗМ в почве того же месторождения Бауан Обо показал, что концентрация РЗМ там в 160 раз превышает средние значения в Китае. Аналогичные результаты были получены при исследовании почв добывающих районов Южного Китая, где даже наименьшая из установленных концентраций РЗМ в 2 раза превышала средние значения по стране [Liang et al., 2014]. Загрязнению подвергаются также водные источники и атмосфера, повышенное содержание редкоземельных металлов обнаружено в растениях.

Очевидно, что такая ситуация с загрязнением окружающей природной среды, характерная для китайской редкоземельной промышленности, категорически противоречит принципам устойчивого развития общества. И это серьезный вызов для мирового сообщества. Экономически развитым странам приходится искать ответ на очень сложный вопрос: как принудить Китай обеспечить необходимый уровень

экологической безопасности производства РЗМ, не снижая при этом объемы экспорта дефицитного сырья из Поднебесной, да еще и без существенного повышения цен? Эта задача рассматривается сразу в двух аспектах: торгово-экономическом и правовом. К ее решению подключен такой глобальный регулятор, как Всемирная торговая организация (ВТО).

Необходимо отметить, что одна из задач ВТО — способствовать эффективному использованию, защите и сохранению мировых ресурсов, что согласуется с принципами устойчивого развития. Для достижения данных целей странам — участникам ВТО разрешено применять торгово-ограничительные меры в целях защиты окружающей среды при соблюдении ряда условий. Статья XX GATT 1994 целиком посвящена защите окружающей среды и позволяет членам ВТО в исключительных обстоятельствах оправдывать введение мер, которые в общем случае не соответствуют нормам торговых соглашений. Подобные исключения помогают находить баланс между свободой международной торговли и национальным суверенитетом. Статья XX рассматривает такие аспекты экологических интересов, как защита жизни и здоровья людей, животных, растений; сохранение ограниченных природных ресурсов. РЗМ как раз являются типичными представителями этих ресурсов.

Не меньшую проблему для сбалансированного развития мировой энергетики представляют не только возникающие споры и противоречия в сфере международной торговли, но и активная внешняя инвестиционная политика Китая. В ответ на действия последнего в отношении приобретения компаний, занимающихся разведкой и разработкой месторождений РЗМ (в Гренландии, США, Австралии), ЕС, США и Австралия предприняли ряд мер, причем не только на правительственном, но и на корпоративном уровне. Речь идет, прежде всего, о создании страховых запасов РЗМ, а также о поиске возможных способов более экономичного их использования. Так, к примеру, в 2013 г. США выделили 120 млн долл. на финансирование исследований по вторичному получению РЗМ из использованных магнитов, а Правительство Японии инвестировало 1,2 млрд долл. США в комплексную разработку новых маршрутов поставки и создания запасов РЗМ, а также исследование их вторичной переработки<sup>10</sup>.

Будет неправильным утверждение о том, что экономически развитые страны не уделяют достаточного внимания экологическим проблемам редкоземельной промышленности Китая. Сложность данного вопроса состоит в том, что трудно найти компромисс в рамках существующей институциональной среды. Выводы экспертов ВТО по торговым спорам между США, ЕС, Японией и Китаем в части регулирования торговли РЗМ являются дискуссионными и определенно не вносят вклад в решение экологических проблем Китая, игнорировать которые становится опасно. Вместе с тем следует отметить, что большие усилия относительно урегулирования негативных последствий в данной сфере должна предпринимать сама страна — поставщик ресурсов, не перекладывая это на потребителей.

Так, по мнению экспертов UNCTAD, наиболее эффективными внутренними мерами, стимулирующими природоохранную деятельность, являются скорее налоги и платежи за загрязнение окружающей среды, нежели ценовая дискриминация

---

<sup>10</sup> UNCTAD (2014). *Commodities at a glance. Special issue on rare earths*. N 5. URL: [http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/suc2014d1\\_en.pdf](http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/suc2014d1_en.pdf) (дата обращения: 05.07.2016).

и экспортные ограничения, ведущие к росту нелегальной добычи и усугублению экологической ситуации<sup>11</sup>.

### Заключение

Проведенный в настоящей статье анализ современного обеспечения «зеленой» энергетики таким важным минеральным сырьем, как РЗМ, позволил выделить наиболее острые проблемы, с которыми могут столкнуться и европейские, и азиатские страны в ближайшей перспективе, и предложить варианты смягчения их негативного воздействия (таблица).

#### Обобщение существующих эколого-экономических и правовых проблем в области ресурсного обеспечения энергетики необходимым сырьем

Проблема	Причина возникновения	Варианты смягчения / устранения
Монопольное положение Китая в качестве производителя и поставщика критических видов сырья	1. Неравномерное территориальное распределение сырьевой базы 2. Ценовая неконкурентоспособность компаний, производящих РЗМ вне Китая, — «выдавливание» американских, австралийских и других производителей с международного рынка 3. Нелегальная добыча РЗМ в Китае	1. Акцент на развитии проектов по добыче РЗМ вне Китая 2. Формирование ассоциации производителей РЗМ для обеспечения более прозрачного функционирования рынка 3. Интенсификация прикладных исследований в области вторичного использования редкоземельных элементов 4. Проведение фундаментальных и прикладных исследований по замещению и более эффективному использованию критического сырья
Дефицит тяжелых РЗМ в Европе и США в средне- и долгосрочной перспективе	4. Истощение сырьевой базы РЗМ и рост внутренних потребностей Китая в них 5. Интенсивное развитие возобновляемой энергетики в Европе и в Азии	5. Пересмотр темпов перехода на возобновляемые источники энергии
Нарушение принципов устойчивого развития	1. Игнорирование китайскими предприятиями экологических требований 2. Игнорирование европейскими и остальными потребителями экологических нарушений, сопутствующих производству РЗМ в Китае	1. Развитие и применение обязательной сертификации импортируемого редкоземельного сырья 2. Ужесточение контроля за деятельностью добывающих предприятий со стороны правительства Китая 3. Гармонизация требований экологических стандартов и реальной экологической ситуации в Китае 4. Согласие на участие в реализации совместных проектов только при условии соблюдения европейских экологических стандартов

Очевидно, что одной из главных проблем, обоснованно вызывающих обеспокоенность европейских потребителей, выступает возрастающее количество видов минерального сырья, относимых к категории «критических». Несогласованность темпов прироста потребности в них и производственных возможностей поставщиков на фоне практически монопольного положения последних ставит под сомнение реалистичность сценариев развития мировой энергетики в части прогнозируемого роста доли ВИЭ в ней.

<sup>11</sup> UNCTAD (2014). Commodities at a glance. Special issue on rare earths. N 5. URL: [http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/suc2014d1\\_en.pdf](http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/suc2014d1_en.pdf) (дата обращения: 05.07.2016).

Концепция устойчивого развития предполагает решение проблем в трех сферах, важных для общества: экономической, социальной и экологической. Если из первой, экономической, сферы выделить технологии, то проблему обеспечения редкоземельными элементами «зеленой» энергетики следует решать в областях экономики, технологий, окружающей природной среды и права.

Представляется, что более пристальное внимание и китайским коллегам, и их зарубежным партнерам, которые связаны с редкоземельной промышленностью, нужно уделить следующим инструментам регулирования:

- в экономике: налоговому и кредитному стимулированию создания новых замещающих материалов / технологий;
- в технологии: созданию новых замещающих материалов / технологий производства ветрогенераторов (а также солнечных батарей) и РЗМ;
- в окружающей природной среде: широкому внедрению экологических стандартов и сертификатов;
- в правовой сфере: законодательному закреплению ответственности за нарушение партнерами международных (в том числе внешнеторговых) сделок экологических норм и стандартов.

На сегодняшний день вопрос о юридической ответственности предприятий за нарушения стандартов экологической устойчивости является дискуссионным. Например, подобные положения в ЕС не имеют правового закрепления, однако ведется детальное обсуждение возможности придания им юридической силы. В качестве аргумента приводится следующее мнение: принятие нормативно-правовых актов заставит менеджмент предприятий вести более осторожную политику управления, результатом которой среди прочего станет соблюдение стандартов по экологической устойчивости. Если отклонение от стандартов совершено не самим европейским предприятием, а его торговым зарубежным партнером в цепи поставок, данное предприятие будет нести ответственность за некорректное поведение своих партнеров. Условием при этом будет принятие ответственности за нарушения торговых партнеров самой корпорацией, что возможно в случае, если зарубежные торговые партнеры участвуют в организации деятельности компании. Такие ситуации имеют место не только при всеохватывающем корпоративном участии: принятие чужой ответственности также возможно при заключении договоров на поставку с иностранными компаниями, так как предприятие, соблюдающее положения, не может уклоняться от несения ответственности путем организации деятельности через другую (зарубежную) компанию. Таким образом, принципы могут оказывать экстратерриториальное воздействие.

В целом проведенная в рамках ЕС дискуссия об ответственности предприятий за нарушение экологически устойчивого и безопасного хозяйствования показала: прилагаются большие усилия по улучшению контроля за соблюдением установленных требований на предприятиях, внедрению ответственности компаний во всей цепи поставок и в сфере заключения договоров о поставках сырья с зарубежными торговыми партнерами.

Перечисленные правовые инструменты в совокупности с технологическими и эколого-экономическими позволят рассчитывать на успех в решении сложной глобальной проблемы обеспечения редкоземельными металлами «зеленой» энергетики в контексте устойчивого развития. Но успешность ее решения обусловлена

необходимостью понимания того, что экономические интересы отдельных крупных компаний (и даже государств) Европы, США не должны преобладать над интересами экологического благополучия общества, включая и страны с невысоким уровнем жизни.

## Литература

- Бобылев С. Н., Захаров В. М.* «Зеленая» экономика и модернизация. Эколого-экономические основы устойчивого развития. 2012. 89 с. URL: [http://www.ecopolicy.ru/upload/File/Bulletins/B\\_60.pdf](http://www.ecopolicy.ru/upload/File/Bulletins/B_60.pdf) (дата обращения: 5.07.2016).
- Жигалов В. М., Пахомова Н. В.* Проблемы модернизации и перехода к инновационной экономике // Проблемы современной экономики. 2015. № 3 (55). URL: <http://www.m-economy.ru/art.php?nArtId=5478> (дата обращения: 05.07.2016).
- Захарова Т. В.* Зеленая экономика и устойчивое развитие России: противоречия и перспективы // Вестн. Томск. гос. ун-та. Экономика. 2015. № 2 (30). С. 116–126.
- Зорина Т. Г.* Устойчивое развитие энергетики: сущность и методические подходы к оценке // Современные технологии управления. 2015. № 1 (49). URL: <http://sovman.ru/article/4905/> (дата обращения: 5.07.2016).
- Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Радченко Д. Н.* Реализация концепции устойчивого развития горных территорий — базис расширения минерально-сырьевого комплекса России // Устойчивое развитие горных территорий. 2015. № 3 (25). С. 46–50.
- Лякин А. Н.* Устойчивое развитие: общество и экономика: обзор материалов конференции // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Серия 5. Экономика. 2014. Вып. 3. С. 174–185.
- Михайлов В. А.* Редкоземельные руды мира: геология, ресурсы, экономика. Киев: Издательско-полиграфический центр «Киевский университет», 2010. 223 с.
- Пахомова Н. В., Малышков Г. Б.* Институциональная поддержка экологических инноваций в условиях перехода на наилучшие доступные технологии: опыт ЕС, задачи для России // Economic Performance, Environmental Innovation, Climate and Energy Policy (Эффективность экономики, экологические инновации, климатическая и энергетическая политика): сб. ст. по результатам международного научно-исследовательского семинара (Санкт-Петербург, 30 сентября 2015 г.) / под ред. Н. В. Пахомовой, К. К. Рихтера. СПб.: Скифия-принт, 2016. 232 с.
- Пленарная дискуссия «Мировая энергетика и устойчивое развитие в XXI веке: тенденции, вызовы и стратегии» в рамках X Московского международного энергетического форума «ГЭК России в XXI веке». 5 апреля 2012. URL: <http://www.mief-tek.com/991.php> (дата обращения: 05.07.2016).
- Порфирьев Б. Н.* Альтернативная энергетика как фактор модернизации экономики в условиях ВТО // «Россия в XXI веке: глобальные вызовы и перспективы развития». Пленарные доклады Второго Международного форума. 12–13 ноября 2013. URL: <http://www.ipr-ras.ru/articles/forum-2013-full-text.pdf> (дата обращения: 05.07.2016).
- Порфирьев Б. Н.* Переход к экологической экономике: вызовы для России // Economic Performance, Environmental Innovation, Climate and Energy Policy (Эффективность экономики, экологические инновации, климатическая и энергетическая политика): сб. ст. по результатам международного научно-исследовательского семинара (Санкт-Петербург, 30 сентября 2015 г.) / под ред. Н. В. Пахомовой, К. К. Рихтера. СПб.: Скифия-принт, 2016. 232 с.
- Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устойчивого развития на период до 2030 года. Итоговый документ 70-й сессии Генеральной ассамблеи ООН 18 сентября 2015. URL: <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/285/75/PDF/N1528575.pdf?OpenElement> (дата обращения: 05.07.2016).
- Салтан А. А.* Вклад зеленых информационных технологий в экологическую устойчивость и энергоэффективность: мировой опыт и ситуация в России // Economic Performance, Environmental Innovation, Climate and Energy Policy (Эффективность экономики, экологические инновации, климатическая и энергетическая политика): сб. ст. по результатам международного научно-исследовательского семинара (Санкт-Петербург, 30 сентября 2015 г.) / под ред. Н. В. Пахомовой, К. К. Рихтера. СПб.: Скифия-принт, 2016. 232 с.
- Скотаренко О. В.* Проблема устойчивого развития в России и за рубежом // Вестн. Моск. гос. техн. ун-та. 2011. Т. 14, № 1. С. 34–37.



- Сергеев И. Б., Лапочкина Л. В.* Устойчивое развитие: теоретико-методологические подходы // Записки горного института, 2009. Т. 184. С. 264–269.
- Сухина Н. Ю., Ильичева А. В.* Категория «устойчивое развитие», ее содержание и теоретическая эволюция // Известия Сочинского гос. ун-та, 2012. № 4 (22). С. 133–136. URL: [http://vestnik.sutr.ru/journals\\_n/1358707695.pdf](http://vestnik.sutr.ru/journals_n/1358707695.pdf) (дата обращения: 05.07.2016).
- Устойчивое развитие: общество и экономика: Обзор материалов II Научной конференции // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Серия 5. Экономика. 2015. Вып. 3. С. 114–124.
- Юрьев Р.* Грязный секрет Apple, или Как разработка редкоземельных элементов вредит экологии и подчиняет себе производство iPhone. 2015. URL: <https://www iPhones.ru/iNotes/403115> (дата обращения: 05.07.2016).
- Biedermann R.P.* China's rare earth sector — between domestic consolidation and global hegemony // International Journal of Emerging Markets. 2014. Vol. 9, N 2. P. 276–293.
- Brumme A.* Wind Energy Deployment and the Relevance of Rare Earths. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014. 87 p.
- Chen Zhanheng.* Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry // Journal of Rare Earths. 2011. Vol. 29, N 1. URL: <http://www.slideshare.net/holythornbird/global-rare-earths-resources-and-scenarios-of-future-rare-earth-industry> (дата обращения: 05.07.2016).
- Critical Materials strategy. U.S. Department of Energy. 2011. URL: [http://energy.gov/sites/prod/files/DOE\\_CMS2011\\_FINAL\\_Full.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf) (дата обращения: 05.07.2016.).
- European Commission (2014). Report on critical raw materials for the EU. URL: [http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical/index_en.htm) (дата обращения: 05.07.2016.).
- European Innovation Partnership on Raw Materials (2012). URL: [https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/eip-raw-materials/en/system/files/ged/88%20f-bi-eip-on-rm-mg-2\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/eip-raw-materials/en/system/files/ged/88%20f-bi-eip-on-rm-mg-2_en.pdf) (дата обращения: 05.07.2016.).
- Graedel T.E.* et al. Methodology of Metal Criticality Determination // Environmental Science & Technology. 2012. Vol. 46 (2). P. 1063–1070.
- He Y.* Reregulation of China's rare earth production and export // International Journal of Emerging Markets. 2014. Vol. 9, N 2. P. 236–256.
- Hoenderdaal S., Luis Tercero Espinoza, Marscheider-Weidemann F., Graus W.* Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies? // Energy. 2013. Vol. 49. P. 344–355.
- Hurst C.* China's Rare Earth Elements Industry: What Can the West Learn? / Institute for the Analysis of Global Security (IAGS), March 2010. URL: <http://www.iags.org/rareearth0310hurst.pdf> (дата обращения: 05.07.2016).
- Knoeri C.* et al. Towards a dynamic assessment of raw materials criticality: Linking agent-based demand — With material flow supply modelling approaches // Science of the Total Environment. 2013. Vol. 461–462. P. 808–812.
- Liang, T., Li K., Wang L.* State of rare earth elements in different environmental components in mining areas of China // Environmental Monitoring and Assessment. 2014. Vol. 186. P. 1499–1513.
- Massari S., Ruberti M.* Rare earth elements as critical raw materials: focus on international markets and future strategies // Resources Policy. 2013. Vol. 38. P. 36–43.
- Morrison W., Tang R.* China's Rare Earth Industry and Export Regime: Economic and Trade Implications for the United States. Congressional Research Service. 2012. 30 April URL: <http://www.fas.org/sgp/crs/row/R42510.pdf> (дата обращения: 05.07.2016.).
- Muller M.A., Schweizer D., Seiler V.* Wealth Effects of Rare Earth Prices and China's Rare Earth Elements Policy // Springer Science+Business Media Dordrecht 2015. URL: [https://www.researchgate.net/publication/272187940\\_Wealth\\_Effects\\_of\\_Rare\\_Earth\\_Prices\\_and\\_China's\\_Rare\\_Earth\\_Elements\\_Policy](https://www.researchgate.net/publication/272187940_Wealth_Effects_of_Rare_Earth_Prices_and_China's_Rare_Earth_Elements_Policy) (дата обращения: 05.07.2016.).
- Nowakowska M.* Defining Critical Raw Materials in the EU: Information Gaps and Available Solutions. 2012. URL: <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/rawmat-Nowakowska-Defining-Critical-Raw-Materials-in-the-EU-Information-Gaps-and-Available-Solutions.pdf> (дата обращения: 05.07.2016.).
- Pan Y., Li H.* Investigating Heavy Metal Pollution in Mining Brownfield and Its Policy Implications: A Case Study of the Bayan Obo Rare Earth Mine. Inner Mongolia, China // Environmental Management. 2016. Vol. 57. P. 879–893.
- Paul J., Campbell G.* Investigating Rare Earth Element Mine — Development in EPA Region 8 and Potential Environmental Impacts. US EPA Document-908R11003. 2011, August 15. URL: <http://nepis.epa.gov/Exec/zyPDF.cgi/P100FH5Y.PDF?Dockey=P100FH5Y.PDF> (дата обращения: 05.07.2016.).
- Resnick Institute Report: Critical Materials for Sustainable Energy Applications, 2011. URL: [http://resnick.caltech.edu/docs/R\\_Critical.pdf](http://resnick.caltech.edu/docs/R_Critical.pdf) (дата обращения: 05.07.2016.).

- Reichl C., Schatz M., Zsak G. WORLD-MINING-DATA: Minerals Production. Vol. 31. Vienna, Federal Ministry of Science, Research and Economy, 2016. 248 p.
- Simandl G.J. Geology and market-dependent significance of rare earth element resources. *Miner Deposita*, 2014. Vol. 49. P. 889–904.
- The raw materials initiative — meeting our critical needs for growth and jobs in Europe. (2008). Communication from the Commission to the European Parliament and the Council. URL: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0699:FIN:en:PDF> (дата обращения: 05.07.2016.).
- Tzimas E. Critical Materials for Energy Technology. *Materials for Energy — SETIS Magazine*. 2015. URL: <https://setis.ec.europa.eu/publications/setis-magazine/materials-energy/critical-materials-energy-technologies-evangelos-tzimas> (дата обращения: 05.07.2016.).
- Vadenbo C., Rørbech Ja., Haupf M., Frischknecht R. Abiotic resources: new impact assessment approaches in view of resource efficiency and resource criticality — 55<sup>th</sup> Discussion Forum on Life Cycle Assessment // *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2014. Vol. 19. P. 1686–1692.
- Van Gosen B. S., Verplanck P.L., Long K. R., Gambogi Joseph, Seal R. R. (2014). The rare-earth elements — Vital to modern technologies and lifestyles: U. S. Geological Survey Fact Sheet, 2014–3078, 4 p. URL: <http://dx.doi.org/10.3133/fs20143078> (дата обращения: 05.07.2016.).

**Для цитирования:** Пашке М., Сергеев И. Б., Лебедева О. Ю. Обеспечение редкоземельными металлами «зеленой» энергетики в контексте устойчивого развития // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 5. Экономика. 2016. Вып. 3. С. 56–73. DOI: 10.21638/11701/spbu05.2016.304.

## References

- Bobylev S. N., Zakharov V. M. “Zelenaia” ekonomika i modernizatsiia. *Ekologo-ekonomicheskie osnovy ustoičivogo razvitiia*, 2012 [*Green Economy and Modernization. Economic and Environmental Outlines of Sustainable Development*, 2012]. 89 p. Available at: [http://www.ecopolicy.ru/upload/File/Bulletins/B\\_60.pdf](http://www.ecopolicy.ru/upload/File/Bulletins/B_60.pdf) (accessed: 05.07.2016. (In Russian))
- Zhigalov V. M., Pakhomova N. V. Problemy modernizatsii i perekhoda k innovatsionnoi ekonomike [Issues of modernization and transition to innovative economy]. *Problemy sovremennoi ekonomiki* [*Issues of Modern Economics*], 2015, no. 3 (55). Available at: <http://www.m-economy.ru/art.php?nArtId=5478> (accessed: 05.07.2016). (In Russian)
- Zakharova T. V. Zelenaia ekonomika i ustoičivoe razvitie Rossii: protivorečii i perspektivy [Green economy and sustainable development of Russia: controversies and prospects]. *Tomsk State University Journal. Economics*, 2015, no. 2 (30), pp. 116–126. (In Russian)
- Zorina T. G. Ustoičivoe razvitie energetiki: sushchnost’ i metodicheskie podkhody k otsenke [Sustainable energy development: essence and methodic approaches to evaluation]. *Sovremennye tekhnologii upravleniia* [*Modern management technologies*], 2015, no. 1 (49). Available at: <http://sovman.ru/article/4905/> (accessed: 5.07.2016). (In Russian)
- Kaplunov D. R., Ryl’nikova M. V., Radchenko D. N. Realizatsiia kontseptsii ustoičivogo razvitiia gornykh territorii — bazis rasshireniia mineral’no-syr’evogo kompleksa Rossii [Implementation of the concept of sustainable development for mining territories as a foundation for the expansion of Russian mineral resources complex]. *Ustoičivoe razvitie gornykh territorii* [*Sustainable development of mountain territories*], 2015, no. 3 (25), pp. 46–50. (In Russian)
- Liakin A. N. Ustoičivoe razvitie: obshchestvo i ekonomika: Obzor materialov konferentsii [Sustainable development: society and economics: Review of the conference proceedings]. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 5. Economics*, 2014, issue 3, pp. 174–185. (In Russian)
- Mikhailov V. A. *Redkozemel’nye rudy mira: geologiya, resursy, ekonomika* [*Rare-earth ores of the world: geology, reserves, economics*]. Kiev, Izdatel’sko-poligraficheskii tsentr “Kievskii universitet”, 2010. 223 p.
- Pakhomova N. V., Malyshev G. B. [Institutional support of environmental innovations in the context of best available technologies: EU practice, challenges for Russia]. *Economic Performance, Environmental Innovation, Climate and Energy Policy (Effektivnost’ ekonomiki, ekologicheskie innovatsii, klimaticheskaia i energeticheskaja politika)*: sb. st. po rezul’tatam mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel’skogo seminarina [*Economic Performance, Environmental Innovation, Climate and Energy Policy: proceedings of the international research-practice seminar*]. St. Petersburg, 30 sentiabria 2015 g. Eds. N. V. Pakhomovoi, K. K. Rikhtera. St. Petersburg, Skifiia-print, 2016. 232 p. (In Russian)
- Plenarnaia diskussiiia “Mirovaia energetika i ustoičivoe razvitie v XXI veke: tendentsii, vyzovy i strategii” v ramkakh X Moskovskogo mezhdunarodnogo energeticheskogo foruma “TEK Rossii v XXI veke”. 5 apreliia 2012 [*Plenary discussion “World energy and sustainable development in 21<sup>st</sup> century: trends, challenges and*

- strategies” in the framework of 10<sup>th</sup> Moscow International Energy Forum “Fuel and Energy Complex of Russia in 21<sup>st</sup> century”. April 5<sup>th</sup> 2012]. Available at: <http://www.mief-tek.com/991.php> (accessed: 05.07.2016). (In Russian)
- Porfir'ev B. N. [Alternative energy as a factor of economy modernization in the context of WTO]. “Rossiia v XXI veke: global'nye vyzovy i perspektivy razvitiia”. *Plenarnye doklady Vtorogo Mezhdunarodnogo foruma. 12–13 noiabria 2013* [“Russia in 21st century: global challenges and development prospects”. *Plenary speeches of the Second International Forum. November 12<sup>th</sup>–13<sup>th</sup> 2013*]. Available at: <http://www.ipr-ras.ru/articles/forum-2013-fulltext.pdf> (accessed: 05.07.2016). (In Russian)
- Porfir'ev B. N. [Transition to environmentally friendly economy: challenges for Russia]. *Economic Performance, Environmental Innovation, Climate and Energy Policy (Effektivnost' ekonomiki, ekologicheskie innovatsii, klimaticheskaiia i energeticheskaiia politika): sb. st. po rezul'tatam mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo seminar. Sankt-Peterburg, 30 sentiabria 2015 g.* [Economic Performance, Environmental Innovation, Climate and Energy Policy: proceedings of the international research-practice seminar. St. Petersburg, September 30<sup>th</sup> 2015]. Eds. N. V. Pakhomovoi, K. K. Rikhtera. St. Petersburg, Skifiia-print, 2016. 232 p. (In Russian)
- Preobrazovanie nashogo mira: Povestka dnia v oblasti ustoichivogo razvitiia na period do 2030 goda. Itogovyi dokument 70 sessii General'noi assamblei OON 18 sentiabria 2015 [Transformation of our world: Agenda in the context of sustainable development until 2030. Concluding document of the 70<sup>th</sup> General Assembly of UN, September 18<sup>th</sup> 2015]. Available at: <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/285/75/PDF/N1528575.pdf?OpenElement> (accessed: 05.07.2016). (In Russian)
- Saltan A. A. [Contribution of green information technologies to environmental sustainability and energy efficiency: global practice and case study for Russia]. *Economic Performance, Environmental Innovation, Climate and Energy Policy (Effektivnost' ekonomiki, ekologicheskie innovatsii, klimaticheskaiia i energeticheskaiia politika): sb. st. po rezul'tatam mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo seminar. Sankt-Peterburg, 30 sentiabria 2015 g.* [Economic Performance, Environmental Innovation, Climate and Energy Policy: proceedings of the international research-practice seminar. St. Petersburg, September 30<sup>th</sup> 2015]. Eds. N. V. Pakhomovoi, K. K. Rikhtera. St. Petersburg, Skifiia-print, 2016. 232 p. (In Russian)
- Skotarenko O. V. Problema ustoichivogo razvitiia v Rossii i za rubezhom [Problem of sustainable development in Russia and abroad]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Herald of Moscow State Technical University]*, 2011, vol. 14, no. 1, pp. 34–37. (In Russian)
- Sergeev I. B., Lapochkina L. V. Ustoichivoe razvitie: teoretiko-metodologicheskie podkhody [Sustainable development: theoretical and methodological approaches]. *Zapiski gornogo instituta [Notes of the Mining Institute]*, 2009, vol. 184, pp. 264–269. (In Russian)
- Sukhina N. Iu., Il'icheva A. V. Kategoriiia «ustoichivoe razvitie», ee sodержanie i teoreticheskaiia evoliutsiia [“Sustainable Development” Notion, Its Essence and Theoretical Development]. *Izvestiia Sochinskogo gos. un-ta [Sochi Journal of economy]*, 2012, no. 4 (22), pp. 133–136. Available at: [http://vestnik.sutr.ru/journals\\_n/1358707695.pdf](http://vestnik.sutr.ru/journals_n/1358707695.pdf) (accessed: 05.07.2016). (In Russian)
- Ustoichivoe razvitie: obshchestvo i ekonomika: Obzor materialov II Nauchnoi konferentsii [Sustainable development: society and economics: review of the proceedings of 2nd scientific conference]. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 5. Economics*, 2015, issue 3, pp. 114–124. (In Russian)
- Iur'ev R. *Griaznyi sekret Apple, ili Kak razrabotka redkozemel'nykh elementov vredit ekologii i podchiniaet sebe proizvodstvo iPhone [Dirty secret of Apple or How development of rare-earth minerals harms the environment and overmasters iPhone production]*. 2015. Available at: <https://www iPhones.ru/iNotes/403115> (accessed: 05.07.2016). (In Russian)
- Biedermann R. P. China's rare earth sector — between domestic consolidation and global hegemony. *International Journal of Emerging Markets*, 2014, vol. 9, no. 2, pp. 276–293.
- Brumme A. *Wind Energy Deployment and the Relevance of Rare Earths*. Wiesbaden, Springer Fachmedien, 2014. 87 p.
- Chen Zhanheng. Global rare earth resources and scenarios of future rare earth industry. *Journal of Rare Earths*, 2011, vol. 29, no. 1. Available at: <http://www.slideshare.net/holythornbird/global-rare-earths-resources-and-scenarios-of-future-rare-earth-industry> (accessed: 05.07.2016).
- Critical Materials strategy*. U.S. Department of Energy. 2011. Available at: [http://energy.gov/sites/prod/files/DOE\\_CMS2011\\_FINAL\\_Full.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/DOE_CMS2011_FINAL_Full.pdf) (accessed: 05.07.2016).
- European Commission (2014). Report on critical raw materials for the EU. Available at: [http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical/index_en.htm) (accessed: 05.07.2016).
- European Innovation Partnership on Raw Materials (2012). Available at: [https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/eip-raw-materials/en/system/files/ged/88%20f-bi-eip-on-rm-mg-2\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/eip-raw-materials/en/system/files/ged/88%20f-bi-eip-on-rm-mg-2_en.pdf) (accessed: 05.07.2016).

- Graedel T. E. et al. Methodology of Metal Criticality Determination. *Environmental Science & Technology*, 2012, vol. 46 (2), pp. 1063–1070.
- He Y. Reregulation of China's rare earth production and export. *International Journal of Emerging Markets*, 2014, vol. 9, no. 2, pp. 236–256.
- Hoenderdaal S., Luis Tercero Espinoza, Marscheider-Weidemann F., Graus W. Can a dysprosium shortage threaten green energy technologies? *Energy*, 2013, vol. 49, pp. 344–355.
- Hurst C. *China's Rare Earth Elements Industry: What Can the West Learn?* Institute for the Analysis of Global Security (IAGS), March 2010. Available at: <http://www.iags.org/rareearth0310hurst.pdf> (accessed: 05.07.2016).
- Knoeri C. et al. Towards a dynamic assessment of raw materials criticality: Linking agent-based demand — With material flow supply modelling approaches. *Science of the Total Environment*, 2013, vol. 461–462, pp. 808–812.
- Liang, T., Li K., Wang L. State of rare earth elements in different environmental components in mining areas of China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, vol. 186, pp. 1499–1513.
- Massari S., Ruberti M. Rare earth elements as critical raw materials: focus on international markets and future strategies. *Resources Policy*, 2013, vol. 38, pp. 36–43.
- Morrison W., Tang R. China's Rare Earth Industry and Export Regime: Economic and Trade Implications for the United States. *Congressional Research Service*. 2012. 30 April. Available at: <http://www.fas.org/sgp/crs/row/R42510.pdf> (accessed: 05.07.2016.).
- Muller M. A., Schweizer D., Seiler V. Wealth Effects of Rare Earth Prices and China's Rare Earth Elements Policy. *Springer Science+Business Media Dordrecht 2015*. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/272187940\\_Wealth\\_Effects\\_of\\_Rare\\_Earth\\_Prices\\_and\\_China's\\_Rare\\_Earth\\_Elements\\_Policy](https://www.researchgate.net/publication/272187940_Wealth_Effects_of_Rare_Earth_Prices_and_China's_Rare_Earth_Elements_Policy) (accessed: 05.07.2016.).
- Nowakowska M. *Defining Critical Raw Materials in the EU: Information Gaps and Available Solutions*. 2012. Available at: <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/rawmat-Nowakowska-Defining-Critical-Raw-Materials-in-the-EU-Information-Gaps-and-Available-Solutions.pdf> (accessed: 05.07.2016.).
- Pan Y., Li H. Investigating Heavy Metal Pollution in Mining Brownfield and Its Policy Implications: A Case Study of the Bayan Obo Rare Earth Mine. Inner Mongolia, China. *Environmental Management*, 2016, vol. 57, pp. 879–893.
- Paul J., Campbell G. *Investigating Rare Earth Element Mine — Development in EPA Region 8 and Potential Environmental Impacts*. US EPA Document-908R11003. 2011, August 15. Available at: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100FHSY.PDF?Dockey=P100FHSY.PDF> (accessed: 05.07.2016.).
- Resnick Institute Report: *Critical Materials for Sustainable Energy Applications, 2011*. Available at: [http://resnick.caltech.edu/docs/R\\_Critical.pdf](http://resnick.caltech.edu/docs/R_Critical.pdf) (accessed: 05.07.2016.).
- Reichl C., Schatz M., Zsak G. *WORLD-MINING-DATA: Minerals Production*. Vol. 31. Vienna, Federal Ministry of Science, Research and Economy, 2016. 248 p.
- Simandl G. J. Geology and market-dependent significance of rare earth element resources. *Miner Deposita*, 2014, vol. 49, pp. 889–904.
- The raw materials initiative — meeting our critical needs for growth and jobs in Europe. (2008). *Communication from the Commission to the European Parliament and the Council*. Available at: <http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2008:0699:FIN:en:PDF> (accessed: 05.07.2016.).
- Tzimas E. Critical Materials for Energy Technology. *Materials for Energy — SETIS Magazine*. 2015. Available at: <https://setis.ec.europa.eu/publications/setis-magazine/materials-energy/critical-materials-energy-technologies-evangelos-tzimas> (accessed: 05.07.2016.).
- Vadenbo C., Rorbech Ja., Haupf M., Frischknecht R. Abiotic resources: new impact assessment approaches in view of resource efficiency and resource criticality — 55<sup>th</sup> Discussion Forum on Life Cycle Assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, vol. 19, pp. 1686–1692.
- Van Gosen B. S., Verplanck P. L., Long K. R., Gambogi Joseph, Seal R. R. (2014). *The rare-earth elements — Vital to modern technologies and lifestyles: U. S. Geological Survey Fact Sheet*, 2014–3078, 4 p. Available at: <http://dx.doi.org/10.3133/fs20143078> (accessed: 05.07.2016.).
- For citation:** Paschke M., Sergeev I. B., Lebedeva O. Y. The Supply of Rare Earths for “Green” Energy and Sustainable Development. *Vestnik of Saint Petersburg University. Series 5. Economics*, 2016, issue 3, pp. 56–73. DOI: 10.21638/11701/spbu05.2016.304.

Статья поступила в редакцию 31 мая 2016 г.  
Статья рекомендована в печать 7 сентября 2016 г.