

МАТЕРИАЛОЕМКОСТЬ И ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ГЛОБАЛЬНОЙ УГЛЕРОДНОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ

УЗЯКОВ Марат Наильевич, д.э.н., uzyakov@inbox.ru, Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Москва, Россия

ORCID: 0000-0003-3452-7188

КОЛПАКОВ Андрей Юрьевич, к.э.н., ankolp@gmail.com, Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Москва, Россия

ORCID: 0000-0003-4812-4582

ПОРФИРЬЕВ Борис Николаевич, академик РАН, b_porfiriev@mail.ru, Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Москва, Россия

ORCID: 0000-0001-8515-3257

ГАЛИНГЕР Александр Александрович, gall2007nvdv@gmail.com, Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Москва, Россия

ORCID: 0000-0001-9561-9065

ЯНТОВСКИЙ Алексей Анатольевич, к.э.н., alex_yen@mail.ru, Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Москва, Россия

ORCID: 0000-0001-5140-0766

Ядром сценариев глобальной углеродной нейтральности являются низкоэмиссионные энергетические технологии, такие как возобновляемые источники энергии, электромобили, накопители энергии. Свойство указанных технологий заключается в их повышенной материалоемкости, причем в отношении энергоемких материалов: стали, алюминия, полимеров, кремния, меди, лития, никеля, кобальта. Статья предлагает метод расчета и количественные оценки мирового потребления энергии, необходимого для материального обеспечения сценариев углеродной нейтральности. В настоящее время инфраструктура низкоэмиссионной экономики потребляет 0,4% всей мировой энергии. К 2050 г. эта величина должна вырасти почти в 20 раз и превысить современное энергопотребление металлургии и промышленности стройматериалов.

Ключевые слова: углеродная нейтральность, материалы, энергия, цемент, сталь, энергетические технологии, возобновляемые источники энергии, электромобили, энергопереход.

DOI: 10.47711/0868-6351-198-80-89

Тема достижения углеродной нейтральности в мире в настоящее время чрезвычайно актуальна, поскольку международное сообщество озабочено проблемой климатических изменений, и в качестве основного механизма их смягчения рассматривает возможность кардинального снижения выбросов парниковых газов. Ведущие эксперты и организации публикуют многочисленные сценарии глобальной углеродной нейтральности, пытаясь обозначить условия и критерии для их гипотетической реализации. Важно подчеркнуть, что подобные аналитические продукты следует рассматривать именно как сценарии (а не предсказания), которые носят демонстрационный характер: они поясняют, какого масштаба усилия требуются со стороны мировой экономики, и какого рода последствия следует ожидать для нее.

Международное энергетическое агентство (МЭА) включило сценарий Net Zero в свой ежегодный энергетический обзор, а также выпустило ряд специализированных исследований, посвященных реализации указанного сценария [1-3]. Среди необходимых условий называются: а) рост вводов мощностей электрогенерации на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в четыре раза к 2030 г. (по

отношению к 2020 г.) и сохранение таких объемов до 2050 г.; б) рост продаж электромобилей в 18 раз к 2030 г. и полный уход от легковых автомобилей с двигателем внутреннего сгорания с 2035 г.; в) снижение энергоемкости мирового ВВП со среднегодовым темпом около 3,2% в период до 2050 г. (для сравнения, за последние 50 лет этот показатель ни разу не выходил за пределы 3%, а в среднем составлял 1,1%); г) мировая экономика должна ежегодно вкладывать дополнительно три трлн долл. в развитие энергетики в течение следующих 30 лет (объем инвестиций должен вырасти в два с половиной раза по сравнению со значениями 2010-2020 гг.); д) стоимость тонны CO₂-экв. эмиссий должна вырасти до 250 долл. в развитых странах и до 55-200 долл. в развивающихся странах к 2050 г. (для сравнения, в 2021 г. средняя стоимость регулируемых эмиссий составила 7,5 долл./т CO₂-экв., а в целом в мире с учетом нерегулируемых выбросов – менее 2 долл.); е) население должно серьезно изменить свои привычки в сфере потребления и перемещения, снизив конечное энергопотребление в мире на 10% к 2050 г.

Кроме того, МЭА прогнозирует рост потребления материалов, критически важных для низкоэмиссионных технологий (литий, никель, кобальт, медь, редкоземельные элементы), в шесть раз к 2040 г. По оценкам известной консалтинговой компании McKinsey, уже к 2030 г. только со стороны производства электромобилей спрос на указанные материалы может возрасти по сравнению с текущим уровнем от двух до 12 раз (в зависимости от конкретного материала), причем быстрее всего этот спрос будет расти на литий. Это, в свою очередь, приведет к увеличению разрыва между предложением и спросом на перечисленные материалы, критичные для производства электромобилей (и другой продукции, требующей низкоэмиссионных технологий изготовления). Так, согласно консервативному сценарию прогноза McKinsey (именуемому «затухающий импульс»), предусматривающему достижение в 2030 г. 29%-ной доли электромобилей в продажах новых авто при некоторых ограничениях их производства, разрыв между спросом и предложением критических материалов может составить 3,7-5,2 млн т. При этом наибольшие трудности преодоления указанного разрыва ожидаются для никеля, тогда как для меди и кобальта ситуация будет менее напряженной. При более жестких сценариях, предполагающих к 2030 г. долю электромобилей в продажах новых авто также 29% («текущая траектория») и 59% («дальнейшее ускорение»), разрыв между спросом и предложением возрастает до 6,9-8,5 млн т и 10,5-12 млн т, соответственно. В последнем случае, очевидно, производителям материалов не удастся резко увеличить их предложение, а автомобильным фирмам – достигнуть намеченного рубежа выпуска электромобилей, либо придется пожертвовать их качеством в пользу менее материалоемких аналогов с сокращенным потенциалом пробега и вытекающими отсюда последствиями для будущего спроса [4].

Та же McKinsey оценивает дополнительные ежегодные инвестиции в энергетическую инфраструктуру и экосистемы величиной 3,5 трлн долл. в период 2021-2050 гг., а общий объем затрат на реализацию сценария глобальной углеродной нейтральности к 2050 г. составит 7,5% мирового ВВП [5]. Если управление процессом мирового энергоперехода окажется неэффективным или не произойдет существенного улучшения технико-экономических характеристик низкоэмиссионных технологий, затраты окажутся еще выше.

NGFS¹ отмечает, что цена эмиссий парниковых газов должна вырасти до величины порядка 250 долл./т CO₂-экв. к 2030 г. и превысить 900 долл./т CO₂-экв. к середине века, чтобы реализовался сценарий углеродной нейтральности [6]. При этом ПАО «Лукойл» приводит оценку ускорения инфляции в мире примерно на 1,5 проц. п. при росте цен на эмиссии до 200 долл./т CO₂-экв. [7].

¹ NGFS – Network for Greening the Financial System.

В России изучение подобных сценариев также становится важным направлением исследований, но они концентрируются на достижении углеродной нейтральности на национальном уровне. ЦЭНЭФ-XXI использует инженерный подход и описывает возможные траектории полного обнуления эмиссий парниковых газов к 2060 г. [8] с акцентом на технико-технологические меры (увеличение поглощающей способности российских экосистем, в первую очередь, лесов, рассматривается в качестве «замыкающей» меры из-за сложности управления этим объектом). Траектории, ориентированные на максимальное использование инженерных решений без опоры на экосистемы, предусматривают цену на эмиссии в размере 216 долл./т CO₂-экв. в 2060 г. Траектории, опирающиеся на использование потенциала российских экосистем, требуют значительно более низкого уровня цены на эмиссии: 30 долл. По мнению специалистов ИНП РАН, при движении к углеродной нейтральности в России наиболее эффективна группа сценариев, сочетающих умеренное тиражирование низкоэмиссионных технологий и максимизацию поглощающей способности экосистем [9]. Амбициозные сценарии широкомасштабного распространения специализированных технико-технологических решений сопряжены с рисками существенного роста цен и последующего замедления экономического роста, а значит, и формирования доходов, которые могли бы быть направлены на нужды низкоуглеродной трансформации.

Для реализации глобальных сценариев углеродной нейтральности немаловажным фактором является высокая географическая концентрация мощностей производства и переработки материалов, критически важных для низкоэмиссионных технологий [3]. Так, более 75% мощностей по производству лития, кобальта, редкоземельных элементов и более половины мощностей по производству меди и никеля контролируются всего тремя крупнейшими странами (для каждого материала набор стран разный). Более половины мощностей меди и лития, производство которых связано с высоким водопотреблением, расположены в регионах с ограниченным доступом к воде. В ряде случаев возможно замещение критических материалов более распространенными альтернативами, однако это ведет к ухудшению технико-экономических характеристик технологических решений [10]. Таким образом, перспективы ресурсного обеспечения сценариев углеродной нейтральности характеризуются серьезными рисками, в том числе политического характера.

На наш взгляд, еще одним важнейшим свойством сценариев углеродной нейтральности является увеличение материалоемкости глобальной энергетической системы². Такие сценарии опираются преимущественно на два класса структурно-технологических трансформаций: 1) переход на ВИЭ в секторе производства электроэнергии с одновременной электрификацией всех сфер; 2) переход к электромобилям в секторе транспорта. Прочие низкоэмиссионные технологии также играют определенную роль, но по масштабам потенциала своего применения заметно уступают ВИЭ и электромобилям. При этом особенность электрогенерации на основе солнечной и ветровой энергии заключается в невысокой плотности энергетического потока, что приводит к необходимости строительства генерирующих мощностей с увеличенными массогабаритными параметрами. При строительстве на каждый гигаватт установленной мощности солнечная и ветровая генерация требуют в разы больше материалов по сравнению с традиционной генерацией. Тот факт, что у солнечного и ветрового оборудования существенно меньше коэффициент использования установленной мощности (15-30% по сравнению с 50-70% у тепловых электростанций) и срок эксплуатации (25 лет по сравнению с 40 годами), делает разницу в материалоемкости разных видов генерации еще

² Колпаков А.Ю., Галингер А.А. Экономическая эффективность распространения электромобилей и возобновляемых источников энергии в России // Вестник РАН. 2020. Т. 90. № 2. С. 128-139. DOI: 10.31857/S086958732002005X.

более драматичной. В среднем каждый гигаваат солнечной генерации требует в три раза больше материалов на инвестиционной стадии, чем газовая электростанция; ветряная генерация – в семь раз. Аналогичная ситуация с другим важным элементом безуглеродной повестки – электромобилями. Вследствие необходимости располагать на борту аккумулирующую батарею, вес электромобиля по определению оказывается выше, чем у традиционных авто. Производители стремятся минимизировать разницу за счет применения облегченных материалов (таких, как алюминий), но, тем не менее, в реальной практике вес электромобиля все равно остается выше на несколько сотен килограммов, что ведет к дополнительному спросу на материалы.

Кроме того, дополнительный спрос предъявляется на весьма энергоемкие материалы: сталь, алюминий, полимеры, кремний, медь, литий, никель, кобальт и др. Это означает, что само создание инфраструктуры низкоэмиссионной экономики будет требовать значительного объема энергии. Изучению данного вопроса посвящено наше исследование.

Методика оценок. В рамках исследования был сформирован сценарий достижения к середине века нулевых выбросов CO₂, связанных с потреблением топливно-энергетических ресурсов в мире³: развитые экономики выходят на такой уровень эмиссий к 2050 г., а развивающиеся – к 2060 г. Такие временные рамки соответствуют целевым установкам ключевых стран-эмиттеров: например, ЕС, США, Канада, Япония, Южная Корея, Австралия стремятся к углеродной нейтральности уже к 2050 г., тогда как Китай и Россия ставят перед собой аналогичную задачу только на 2060 г.

Разработанный сценарий предполагает полную электрификацию всех сфер жизни при одновременной переориентации сектора производства электроэнергии на ВИЭ. В сфере дорожного транспорта происходит полный переход на электромобили. Ряд промышленных процессов и видов транспорта, где электрификация невозможна или крайне неэффективна, переориентируются на «зеленый» водород, производимый методом электролиза с использованием электроэнергии, выработанной на основе ВИЭ. Все новые вводы генерирующих мощностей происходят за счет солнечных и ветряных электростанций (СЭС и ВЭС, соответственно). Для обеспечения надежности энергоснабжения предусмотрена балансировка нагрузок путем организации системы накопителей электроэнергии [11]. Потребление углеводородов сохраняется только для неэнергетических нужд (сырье для химической промышленности, масла и смазочные материалы, строительные материалы, фильтры).

Масштаб распространения низкоэмиссионных технологий в разработанном сценарии приведен в табл. 1. Объемы их ежегодных вводов вырастают в десятки раз за 2021-2050 гг., после чего несколько снижаются в результате того, что в рамках сценария развитые страны достигают нулевых эмиссий CO₂ к 2050 г., т. е. происходит полное внедрение низкоэмиссионных технологий, и в период 2050-2060 гг. им требуется лишь замещать фонды, выбывающие по причине износа. Практически все новые вводы в 2050-2060 гг. приходятся на развивающиеся экономики.

Расчет потребления энергии при создании инфраструктуры низкоэмиссионной экономики происходит на основе следующих тождеств:

$$E^T = \sum_m C_m^T \cdot e_m \quad (1)$$

$$C_m^T = REN^T \cdot r_m + BEV^T \cdot b_m + S^T \cdot s_m \quad (2)$$

где E^T – потребление энергии в год T ; C_m^T – потребление материала m в год T ; e_m – энергоемкость материала m ; REN^T – вводы генерации на основе ВИЭ в год T ;

³ Колтаков А.Ю., Янговский А.А., Галингер А.А. Цена достижения нулевых эмиссий CO₂ к середине века: метод и оценка для крупнейших экономик мира // Журнал Новой экономической ассоциации. 2022. № 3. С. 139-154. DOI: 10.31737/2221-2264-2022-55-3-7.

r_m – удельная потребность в материале m при строительстве объектов генерации на основе ВИЭ; BEV^T – объем производства аккумуляторных батарей для электромобилей в год T ; b_m – удельная потребность в материале m при производстве аккумуляторных батарей для электромобилей; S^T – вводы мощностей накопителей энергии в год T ; s_m – удельная потребность в материале m при создании системы накопителей энергии.

Таблица 1

Масштаб распространения низкоэмиссионных технологий в мире в сценарии глобального достижения нулевых энергетических выбросов CO₂ к середине века

Показатель	2010 г.	2021 г.	2030 г.	2040 г.	2050 г.	2060 г.
Ввод мощностей ВЭС, ГВт	31	102	669	1782	2664	1985
Ввод мощностей СЭС, ГВт	17	177	754	2010	3004	2238
Продажи электромобилей, млн ед.	0	6	50	99	152	112
Ввод мощностей накопителей, млн кВт·ч	0	19	89	377	1328	1179

Источники данных: 2010-2021 гг. – IEA, REN21; 2030-2060 гг. – оценки авторов.

Показатели материалоемкости низкоэмиссионных технологий представлены в табл. 2. Следует отметить, что для каждой низкоэмиссионной технологии существует несколько различных технических решений, которые отличаются по параметрам используемых материалов. Здесь мы рассматриваем типовое решение для наземной ВЭС, литий-ионных аккумуляторов для электромобиля мощностью 60 кВт·ч, литий-ионных накопителей электроэнергии. Для СЭС можно выделить два подтипа, в зависимости от основного материала каркаса солнечных панелей. Стальной каркас является прочным и менее затратным решением, поэтому он используется при строительстве больших промышленных СЭС. Однако при установке солнечных панелей на зданиях стальной каркас может оказаться слишком тяжелым с точки зрения несущей способности ограждающих конструкций, поэтому в данном случае целесообразнее использовать облегченный каркас из алюминия. В дальнейших расчетах мы предполагаем, что половина всех вводов СЭС имеет стальной каркас, и половина – алюминиевый.

Таблица 2

Материалоемкость низкоэмиссионных технологий

Показатель	1 МВт ВЭС (наземная), т	1 МВт СЭС (стальной каркас), т	1 МВт СЭС (алюминиевый каркас), т	Батарея электромобиля (литий-ионная), кг	1 МВт·ч накопительной мощности (литий-ионная), кг
Полимеры	11			98	1636
Бетон	661	25	25		
Чугун	8				
Сталь	49	234		48	806
Алюминий			85	67	1115
Медь	1			54	901
Поликремний		3,5	3,5		
Графит				38	640
Соединения лития				27	451
Никель				20	332
Кобальт				3	47
Магний				4	71
Прочее	53	92	92		
Всего	783	356	207	360	6000

Источники: оценки авторов на основе [3; 12-14].

Важную часть материалоемкости рассматриваемых технологий составляют фундаменты, опорные конструкции и каркасы, обеспечивающие крепление всех элементов друг к другу. В ВЭС на них приходится около 90% веса всей конструкции, в СЭС и аккумуляторах – около 60-65%.

Энергоемкость материалов, используемых в низкоэмиссионных технологиях, представлена в табл. 3. Для части материалов были использованы зарубежные оценки по среднему расходу топливно-энергетических ресурсов на жизненном цикле, для части – выполнены расчеты на основе данных формы статистической отчетности Росстата 4-ТЭР, которая позволяет отслеживать расход топливно-энергетических ресурсов для конкретных видов продукции по технологической цепочке их создания.

Таблица 3

Средняя энергоемкость материалов на жизненном цикле, кг у. т./т

Показатель	Твердое топливо	Жидкое топливо	Природный газ	Электроэнергия	Тепловая энергия	Итого
Полимеры	3	101	17	474	28	623
Бетон	1	0,5	148	14	13	176
Чугун	455	3	131	23	7	619
Сталь	455	4	217	64	16	757
Алюминий		42	726	3777		4545
Медь		628	1266	1935		3828
Поликремний	1871			8610		10481
Графит	1496	2222	82	5	3	3807
Соединения лития	193	127	42	39	558	959
Никель, кобальт, магний				3	90	93

Источники: [15-20], оценки авторов на основе статистической формы Росстата 4-ТЭР.

Результаты. Результаты расчетов по описанной методике представлены в табл. 4.

Согласно нашим оценкам, динамичное развитие низкоэмиссионных технологий привело к существенному увеличению физических объемов мирового потребления материалов и энергии (на нужды этих технологий) за 2010-2021 гг. – в четыре с половиной и семь раз соответственно. Наиболее значимые материалы: бетон (на него приходится 54% общей массы всех материалов в 2021 г. и 16% энергии), чугун и сталь (20 и 25% соответственно) и алюминий (6 и 45%). На медь, литий, никель, кобальт, магний, поликремний, графит приходится совокупно 1% массы материалов и 12% энергии. При этом потребление 98% материалов и 93% энергии обусловлено вводом генерирующих мощностей СЭС и ВЭС. Оставшиеся объемы (2 и 7% соответственно) приходятся на батареи для электромобилей и накопители энергии.

К 2050 г. мировое потребление материалов на нужды создания низкоэмиссионной экономики вырастет к уровню 2021 г. в среднем в 23 раза: потребление поликремния, чугуна, стали, алюминия – в 17-19 раз, прочих материалов – в 26 раз; потребление энергии – в 20 раз.

Табл. 5 демонстрирует, что это означает с точки зрения современных⁴ объемов производства.

На нужды внедрения низкоэмиссионных технологий в мире сегодня тратится в пределах 2,5% полимеров, черных металлов и меди; 6,5% – никеля, кобальта и магния; 12,5% – алюминия; более 20% графита и лития; а также практически весь поликремний, производство которого заточено на развитие солнечной генерации.

⁴ В качестве показателей современного объема производства использованы значения 2019 или 2021 гг., в зависимости от доступных данных.

Таблица 4

Потребление материалов и энергии на создание инфраструктуры низкоэмиссионной экономики в сценарии достижения к середине века нулевых выбросов CO₂, связанных с потреблением топливно-энергетических ресурсов, в мире

Показатель	Потребление материалов, млн т						Потребление энергии, млн т у. т.					
	2010 г.	2021 г.	2030 г.	2040 г.	2050 г.	2060 г.	2010 г.	2021 г.	2030 г.	2040 г.	2050 г.	2060 г.
Низкоэмиссионные технологии, всего												
Всего, в том числе:	29,0	131,9	753,3	1996,1	2989,6	2228,2	10,7	79,7	397,0	1032,9	1556,9	1161,1
Полимеры	0,3	1,8	12,4	30,0	46,4	34,7	0,2	1,1	7,7	18,7	28,9	21,6
Бетон	20,9	71,8	460,8	1228,2	1835,8	1368,0	3,7	12,7	81,2	216,4	323,4	241,0
Чугун, сталь	3,8	26,8	128,8	341,8	511,7	381,4	2,8	20,2	96,7	256,7	384,3	286,4
Алюминий	0,7	8,0	35,5	92,5	139,3	103,9	3,3	36,2	161,3	420,3	633,3	472,3
Медь	0,0	0,5	3,5	7,5	12,1	9,1	0,1	1,8	13,3	28,7	46,3	34,8
Поликремний	0,1	0,6	2,6	7,0	10,5	7,8	0,6	6,5	27,7	73,7	110,2	82,1
Графит	0,0	0,3	2,0	4,1	6,7	5,0	0,0	1,0	7,6	15,5	25,5	19,2
Соединения лития	0,0	0,2	1,4	2,9	4,7	3,6	0,0	0,2	1,3	2,7	4,5	3,4
Никель, кобальт, магний	0,0	0,2	1,4	2,9	4,7	3,6	0,0	0,0	0,1	0,3	0,4	0,3
ВЭС и СЭС												
Всего, в том числе:	29,0	129,4	734,7	1958,1	2926,7	2180,9	10,7	74,4	356,5	950,1	1420,1	1058,2
Полимеры	0,3	1,1	7,4	19,6	29,3	21,8	0,2	0,7	4,6	12,2	18,2	13,6
Бетон	20,9	71,8	460,8	1228,2	1835,8	1368,0	3,7	12,7	81,2	216,4	323,4	241,0
Чугун, сталь	3,8	26,5	126,3	336,7	503,3	375,0	2,8	20,0	94,8	252,8	377,9	281,6
Алюминий	0,7	7,5	32,0	85,4	127,7	95,1	3,3	34,2	145,6	388,2	580,2	432,3
Медь	0,0	0,1	0,7	1,8	2,7	2,0	0,1	0,4	2,6	6,8	10,2	7,6
Поликремний	0,1	0,6	2,6	7,0	10,5	7,8	0,6	6,5	27,7	73,7	110,2	82,1
Батареи для электромобилей и накопители энергии												
Всего, в том числе:	0,0	2,4	18,6	38,0	62,9	47,3	0,0	5,3	40,5	82,8	136,8	102,9
Полимеры	0,0	0,7	5,1	10,4	17,1	12,9	0,0	0,4	3,2	6,5	10,7	8,0
Сталь	0,0	0,3	2,5	5,1	8,4	6,4	0,0	0,2	1,9	3,9	6,4	4,8
Алюминий	0,0	0,5	3,5	7,1	11,7	8,8	0,0	2,0	15,7	32,1	53,1	39,9
Медь	0,0	0,4	2,8	5,7	9,4	7,1	0,0	1,4	10,7	21,9	36,1	27,2
Графит	0,0	0,3	2,0	4,1	6,7	5,0	0,0	1,0	7,6	15,5	25,5	19,2
Соединения лития	0,0	0,2	1,4	2,9	4,7	3,6	0,0	0,2	1,3	2,7	4,5	3,4
Никель, кобальт, магний	0,0	0,2	1,4	2,9	4,7	3,6	0,0	0,0	0,1	0,3	0,4	0,3

Источник: оценки авторов.

В 2050 г. спрос на отдельные материалы превысит существующие производственные мощности: по алюминию, никелю, кобальту, магнию – примерно в 2 раза; по литию и графиту – в 6 раз; по поликремнию – более чем в 15 раз.

Что касается энергии, то инфраструктура низкоэмиссионной экономики потребляет в настоящее время 0,4% ее общих объемов. Однако к 2050 г. эта величина должна вырасти до 7,5%, после чего несколько снизится до 5,6% к 2060 г.

Указанный объем энергопотребления на 86% обусловлен потреблением достаточно традиционных конструкционных материалов – бетон, сталь, алюминий. Проблема более «редких» материалов (кремний, литий, никель, кобальт) касается в первую очередь их непосредственной доступности с точки зрения производственных мощностей, однако энергоснабжение таких производств не станет критической проблемой в перспективе.

Таблица 5

Потребление материалов и энергии на создание инфраструктуры низкоэмиссионной экономики как доля от их современного объема производства, %

Показатель	2021 г.	2030 г.	2040 г.	2050 г.	2060 г.
Полимеры	0,5	3,5	8,3	12,9	9,7
Бетон	1,7	10,7	28,6	42,8	31,9
Чугун	0,1	0,4	1,0	1,5	1,1
Сталь	1,4	6,6	17,5	26,2	19,5
Алюминий	12,5	55,8	145,3	218,9	163,2
Медь	2,3	17,0	36,7	59,3	44,5
Поликремний	99,8	425,0	1132,6	1692,9	1261,5
Графит	25,1	192,8	394,1	651,3	489,8
Соединения лития	21,4	164,4	336,0	555,4	417,7
Никель, кобальт, магний	6,5	49,9	102,0	168,6	126,8
Энергия	0,4	1,9	5,0	7,5	5,6

Источник: оценки авторов.

При этом следует понимать, что 7,5% всей энергии в мире – это больше, чем совокупное функционирование черной и цветной металлургии, а также производства стройматериалов (на эти отрасли вместе приходится 7,3% потребленной энергии в мире). Фактически, в сценарии достижения нулевых выбросов CO₂ к середине века мировой топливно-энергетический комплекс будет вынужден обеспечить не одну, а две современных металлургических отрасли и две промышленности стройматериалов (при прочих равных, не считая их неизбежного органического роста, связанного с расширением мировой экономики).

* * *

Амбициозные низкоэмиссионные сценарии развития представляют настоящий вызов для мировой экономики, поскольку являются чрезвычайно требовательными с точки зрения условий их реализации. Это становится очевидно при рассмотрении базовых гипотез об эволюции технико-экономических характеристик технологий, о параметрах специализированных политик и механизмов финансирования, а также при анализе обратных эффектов, возникающих при масштабном тиражировании низкоэмиссионных решений.

Известны оценки МЭА и крупнейших консалтинговых компаний, которые показывают многократное увеличение глобального спроса на материалы, являющиеся критически важными для низкоэмиссионных технологий (никель, литий, кобальт, медь, редкоземельные элементы), а также ожидаемый в связи с этим рост разрыва между спросом и предложением указанных материалов. Ситуация усугубляется чрезвычайно высокой

концентрацией мощностей по их производству и переработке в небольшом числе стран и, соответственно, возможностями контроля оборота этих материалов.

Наши оценки показывают, что не менее критичным является спрос на более традиционные материалы, которые используются при строительстве фундаментов, опорных конструкций и каркасов, обеспечивающих крепление всех элементов друг к другу. Речь идет о бетоне, стали, алюминии. В целом создание инфраструктуры низкоэмиссионной экономики требует сегодня 0,4% всей вырабатываемой энергии. В сценарии достижения нулевых энергетических эмиссий CO₂ к середине века эта величина вырастет до 7,5%, причем подавляющая часть указанного энергопотребления обусловлена «традиционными» конструкционными материалами.

Этот факт нельзя игнорировать при построении сценарных прогнозов низкоэмиссионного развития, поскольку ожидаемые значительные дополнительные объемы спроса на энергию необходимо будет покрыть, используя для этого технические решения с минимальными сопутствующими эмиссиями. По сути дела, речь идет о своего рода мультипликаторе роста энергопотребления на инвестиционной стадии при тиражировании низкоэмиссионных технологий. Его правомерно рассматривать как аналог известного мультипликатора выбросов парниковых газов, который включает три сферы или охвата (scopes) производства и потребления продукции, прямо или косвенно связанные с эмиссиями указанных газов, и который кратно увеличивает учитываемые объемы этих эмиссий. Представляется, что рассматриваемый мультипликатор роста энергопотребления (и шире – потребления материальных ресурсов) также должен приниматься в расчет при корректной оценке и построении прогнозов, и далее – при выработке эффективных путей реализации политики социально-экономического развития с низким уровнем эмиссий, осуществляемой подавляющим большинством государств мира, включая Россию, в соответствии с требованиями Парижского соглашения по климату.

Литература / References

1. IEA. *World Energy Outlook 2021*. 2021. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>
2. IEA. *Net Zero by 2050*. 2021. URL: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
3. IEA. *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. 2021. URL: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
4. Callaway G., Ding Ch., Fitzgibbon T., Gregor H., Malik M.N., Smith M. *Could supply-chain issues derail the energy transition?* / McKinsey and Company. December 2022. 6 p. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/could-supply-chain-issues-derail-the-energy-transition#/>
5. McKinsey. *The net-zero transition: What it would cost, what it could bring*. 2022. URL: <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/the-net-zero-transition-what-it-would-cost-what-it-could-bring>
6. NGFS. *NGFS Climate Scenarios for central banks and supervisors*. 2021. URL: https://www.ngfs.net/sites/default/files/media/2021/08/27/ngfs_climate_scenarios_phase2_june2021.pdf
7. ЛУКОЙЛ. *Перспективы развития мировой энергетики до 2050 года*. 2021. URL: <https://lukoil.ru/FileSystem/9/570591.pdf> [LUKOIL. *Prospects for the development of world energy until 2050*. 2021. (In Russ.)]
8. CENEF-XXI. *Russia's carbon neutrality: pathways to 2060*. 2022. URL: <https://cenef-xxi.ru/en/articles/russia-s-carbon-neutrality-pathways-to-2060>
9. Порфирьев Б.Н., Широков А.А., Колпаков А.Ю., Единак Е.А. *Возможности и риски политики климатического регулирования в России // Вопросы экономики*. 2022. № 1. С. 72-89. URL: <https://doi.org/10.32609/0042-8736-2022-1-72-89> [Porfiriev B.N., Shirov A.A., Kolpakov A.Y., Edinak E.A. *Opportunities and risks of the climate policy in Russia // Voprosy Ekonomiki*. 2022. No. 1. Pp. 72-89. (In Russ.)]
10. Gielen D. *Critical minerals for the energy transition* / International Renewable Energy Agency. 2021. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Technical-Papers/IRENA_Critical_Materials_2021.pdf
11. Veselov F., Pankrushina T., Khorshev A. *Comparative economic analysis of technological priorities for low-carbon transformation of electric power industry in Russia and the EU // Energy Policy*. 2021. Vol. 156. Article 112409. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112409>
12. Engström S., Lyner T., Hassanzadeh M. et al. *Tall towers for large wind turbines. Report from Vindforsk project V-342 / Högatorn för vindkraftverk Elforsk rapport. Högatorn för vindkraftverk, Vindforsk, Stockholm. Sweden. 2010. SEAI.*
13. Mitavachan H., Gokhale A., Srinivasan J. *A case study of 3-MW scale grid-connected solar photovoltaic power plant at Kolar*. 2011. URL: <https://ru.scribd.com/document/174353088/A-case-study-of-3-MW-scale-grid-connected-solar-photovoltaic-power-plant-at-Kolar-Karnataka>
14. Romare M., Dahllöf L. *The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries. A Study with Focus on Current Technology and Batteries for light-duty vehicles* / Swedish Environmental Research Institute. 2017. URL: <https://www.ivl.se/download/18.694ca0617a1de98f473b98/1628417788414/FULLTEXT01.pdf>

15. Khripko D., Schlüter B.A., Rommel B. et al. *Energy demand and efficiency measures in polymer processing: comparison between temperate and Mediterranean operating plants* // *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 2016. Vol. 7. Pp. 225-233. URL: <https://doi.org/10.1007/s40095-015-0200-2>
16. Pitt C., Wadsworth M. *Current Energy Requirements in the Copper Producing Industries* // *Journal of metals*. 1981. Vol. 33. Iss. 6. Pp. 25-34. DOI 10.1007/BF03339422.
17. Choate W., Green J. U.S. *Aluminum Production Energy Requirements: Historical Perspective, Theoretical Limits, and New Opportunities*. URL: <https://ru.scribd.com/document/490238276/SS03-Panel1-Paper01-pdf>
18. Talka M., Kamfjord N., Tveit H., Kjelstrup S. *Energy and exergy analysis of the silicon production process* // *Energy*. 2013. Vol. 58. Pp. 138-146. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.04.051>
19. Ramos A., del Cañizo C., Valdehita J., Zamorano J.C., Luque A. *Radiation heat savings in polysilicon production: Validation of results through a CVD laboratory prototype*. URL: https://oa.upm.es/26089/1/INVE_MEM_2013_162591.pdf
20. Dunn J.B., Barnes M., Gaines L., Sullivan J., Wang M. *Material and energy flows in the material production, assembly, and end-of life stages of the automotive lithium-ion battery life cycle* / Argonne National Laboratory. 2012. ANL/ESD/12-3. DOI:10.2172/1044525.



Статья поступила в редакцию 26.12.2022. Статья принята к публикации 09.01.2023.

Для цитирования: М.Н. Узяков, А.Ю. Колпаков, Б.Н. Порфирьев, А.А. Галингер, А.А. Ян-товский. Материалоемкость и энергоёмкость глобальной углеродной нейтральности // Проблемы прогнозирования. 2023. № 3 (198). С. 80-89.
DOI: 10.47711/0868-6351-198-80-89

Summary

MATERIALS AND ENERGY INTENSITY OF THE GLOBAL CARBON NEUTRALITY

M.N. UZYAKOV, Doct. Sci. (Econ.), Institute of Economic Forecasting, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0003-3452-7188. Scopus Author ID: 15019919900

A.Yu. KOLPAKOV, Cand. Sci. (Econ.), Institute of Economic Forecasting, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0003-4812-4582. Scopus Author ID: 55039903300

B.N. PORFIRIEV, Academician of RAS, Institute of Economic Forecasting, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0001-8515-3257. Scopus Author ID: 6603270384

A.A. GALINGER, Institute of Economic Forecasting, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0001-9561-9065. Scopus Author ID: 57216334965

A.A. YANTOVSKII, Cand. Sci. (Econ.), Institute of Economic Forecasting, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ORCID: 0000-0001-5140-0766. Scopus Author ID: 57193432605

Abstract: Development of the low-emission energy technologies including renewable energy sources, electric vehicles, and energy storage facilities make up the core of global carbon neutrality scenarios. These technologies stand out by their increased materials intensity, and in particular that of energy-intensive materials: steel, aluminum, polymers, silicon, copper, lithium, nickel, cobalt. The article introduces a method for calculating and assessment of the global energy consumption to sustain carbon neutrality scenarios. Currently, the infrastructure of the low-emission economy consumes 0.4% of the world's energy. By 2050, this should increase by almost 20 times and exceed the current energy consumption of metallurgy and the construction materials industry.

Keywords: carbon neutrality, materials, energy, cement, steel, energy technologies, renewable energy sources, electric vehicles, energy transition.

Received 26.12.2022. Accepted 09.01.2023.

For citation: M.N. Uzyakov, A.Yu. Kolpakov, B.N. Porfiriev, A.A. Galinger, and A.A. Yantovskii. Materials and Energy Intensity of the Global Carbon Neutrality // *Studies on Russian Economic Development*. 2023. Vol. 34. No. 3. Pp. 335-341.
DOI: 10.1134/S1075700723030164