

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В РОССИИ

© 2020 г. А. Ю. Колпаков^{а,*}, А. А. Галингер^{а,**}

^а Институт народнохозяйственного прогнозирования РАН, Москва, Россия

*E-mail: ankolp@gmail.com

**E-mail: gall2007nvdv@gmail.com

Поступила в редакцию 28.09.2019 г.

После доработки 15.10.2019 г.

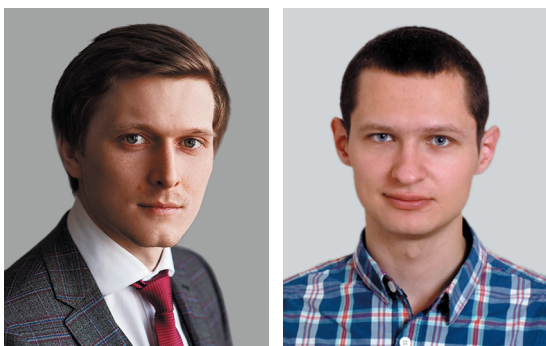
Принята к публикации 13.11.2019 г.

Климатическая политика становится важной компонентой формирования мировой экономической динамики. Набор мер по борьбе с изменением климата широк, но преимущественно сводится к увеличению доли электромобилей и возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Для России эти меры рациональны с точки зрения снижения выбросов CO₂, однако ведут к ухудшению макроэкономических показателей. Более высокая материалоемкость низкоуглеродных технологий обеспечивает увеличение выпуска продукции, но их общий недостаток – критическая потребность в дополнительном импорте. Кроме того, смещение структуры выработки электроэнергии в сторону ВИЭ приведёт к недополучению дохода от реализации собственного природного газа или угля внутри российской экономики. Это принципиально отличает Россию от стран, импортирующих углеродосодержащие энергоресурсы, так как для них ВИЭ – один из способов экономии на топливных закупках с внешнего рынка.

Ключевые слова: электромобили, возобновляемые источники энергии, затраты–выпуск, климатическая политика, Парижское соглашение, импорт, технологии.

DOI: 10.31857/S086958732002005X

За последние десятилетия климатическая повестка стала одним из главных критериев формирования социально-экономической и энергетической политики в большинстве стран мира.



КОЛПАКОВ Андрей Юрьевич – кандидат экономических наук, старший научный сотрудник ИНП РАН.
ГАЛИНГЕР Александр Александрович – младший научный сотрудник ИНП РАН.

В докладах Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) было показано, что к 2017 г. среднемировая температура повысилась приблизительно на 1°C по сравнению с доиндустриальным уровнем (за базу отсчёта принят период 1850–1900 гг.). Без радикальных преобразований структуры хозяйственных систем продолжающийся рост мировой экономики и численности населения будет способствовать дальнейшему потеплению, которое к концу XXI в. с большой долей вероятности превысит отметку 2°C. Целевой сценарий МГЭИК по сдерживанию роста температуры в пределах 1.5°C по сравнению с доиндустриальным уровнем требует оперативной и беспрецедентной трансформации всех сфер общества [1].

Среди глобальных последствий климатических изменений называются: повышение уровня Мирового океана, сокращение урожая зерновых, учащение экстремальных погодных явлений, возрастание количества осадков, сокращение снеж-

ного покрова суши, деградация вечной мерзлоты. Перечисленные эффекты характеризуются широким воздействием на функционирование природных систем и человека. Без применения мер сдерживания глобального потепления мировой ВВП потеряет 1–3.3% к 2060 г. и 2–10% к 2100 г., причём негативные тенденции будут наблюдаться практически во всех регионах мира [2]. Безусловно, климатические изменения способны обеспечивать локальные позитивные эффекты для экономических систем отдельных стран (Россия, Канада) [2, 3], однако глобальный характер рисков вызывает озабоченность мирового сообщества. Принятие срочных мер по борьбе с изменением климата и его последствиями – одна из 17 целей устойчивого развития (Цель 13), сформулированных ООН.

Эксперты МГЭИК на 95% уверены, что антропогенное воздействие является основной причиной глобального потепления [4]. В значительной степени климатические изменения связываются с выбросами углекислого газа (CO_2), главный источник которых – потребление углеродосодержащих энергоресурсов (уголь, нефть, природный газ). Таким образом, внимание мировой общественности концентрируется на необходимости сдерживания выбросов CO_2 путём трансформации энергетического сектора.

Набор решений достаточно широк и содержит меры по повышению эффективности энергопотребления во всех сферах, по энергосбережению, замещению углеродосодержащих топлив низкоуглеродными. Технологическим ядром трансформационных процессов (по крайней мере, на ближайшие десятилетия) выступает генерация электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и распространение электромобилей (ЭМ). Форсирование и тиражирование решений именно в этой области составляет центральное звено национальных планов большинства стран-участниц Парижского соглашения.

Распространение низкоуглеродных технологий, поддерживаемое ведущими странами в контексте борьбы с изменением климата, ведёт к организации новых технологических цепочек, структурным сдвигам в использовании сырья и материалов, а также к изменению роли отдельных стран в энергообеспечении мировой экономики. Эффекты этих решений будут неоднородными – они зависят от структурных характеристик экономики и энергетики конкретной страны. Оценка последствий предпринимаемых мер очень важна, поскольку только ясное понимание возможных качественных и количественных сдвигов позволит выстроить чёткую систему управления

рисками и стратегию эффективного встраивания экономики отдельных стран в траектории низкоуглеродного развития мирового сообщества.

Россия подписала Парижское соглашение в 2016 г., заявив в качестве цели сокращение выбросов CO_2 к 2030 г. на 25–30% ниже уровня 1990 г., и ратифицировала его постановлением Правительства РФ № 1228 от 21.09.2019 “О принятии Парижского соглашения”. Дополнительно было сделано заявление о неприемлемости использования Парижского соглашения и его механизмов как инструмента создания барьеров для устойчивого социально-экономического развития стран-участниц. Этот акцент определяет важность всестороннего анализа последствий применения мер климатической политики в России, выявления возможных рисков и определения путей их снижения.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВИЭ И ЭМ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ CO_2

ВИЭ и ЭМ характеризуются нулевыми выбросами CO_2 на стадии эксплуатации, поэтому с экологической точки зрения считаются более приемлемыми альтернативами традиционным топливам. Однако если рассматривать полный жизненный цикл ВИЭ и ЭМ, ситуация окажется не столь однозначной. Так, генерация электроэнергии на основе ВИЭ высоко материалоемка на этапе создания мощностей, поэтому значительные выбросы CO_2 приходится на инвестиционную стадию, они обусловлены потреблением энергии для обеспечения производства необходимыми материалами и компонентами. Что касается ЭМ, то их использование требует аккумуляторных батарей, создание которых очень энергоёмко. Кроме того, электроэнергия, потребляемая ЭМ, производится в том числе на основе углеводородных топлив, что сопряжено с образованием выбросов CO_2 .

Оценка экологической эффективности применения ВИЭ и ЭМ – востребованное и достаточно популярное направление научно-исследовательских работ. Причём в отношении ВИЭ результат получается вполне однозначным: производство электроэнергии на основе солнечной и ветровой энергии создаёт меньше выбросов на протяжении жизненного цикла продукции по сравнению с угольной и газовой генерацией [5]. Между тем диапазон мнений и оценок в отношении ЭМ остаётся широким, и зачастую можно встретить прямо противоположные.

С точки зрения средних значений технологий использования ЭМ действительно характеризуются меньшими выбросами на протяжении жизненного цикла [6]. В США доля выбросов, которая может быть сэкономлена при использовании ЭМ, оценивается в 10–50% [7–9]. Для большинства европейских стран выбор ЭМ оценивается

позитивно: по сравнению с наиболее эффективными автомобилями с двигателем внутреннего сгорания (ДВС) он обеспечивает на 30% меньше выбросов в среднем по ЕС, на 15% – в Нидерландах, на 25% – в Великобритании, на 55% – во Франции, на 65% – в Норвегии [10]. Общим выводом является нерациональность использования ЭМ в Китае, так как, по разным оценкам, они генерируют до 50% больше выбросов CO₂, чем современные дизельные автомобили [8, 9]. Для Германии результаты противоречивы. Согласно одним оценкам, использование ЭМ здесь может вести к снижению выбросов на 15–28% по сравнению с дизельным автомобилем [11, 12], согласно другим работам, вследствие высокой доли угольной генерации объём выбросов при использовании ЭМ будет сопоставим с наиболее эффективными дизельными автомобилями [10] либо даже выше на 28% [13].

Причина столь отличающихся оценок заключается в сценарных гипотезах, принятых в процессе расчётов, главные из которых:

- расход топлива традиционных автомобилей с ДВС;
- выбросы CO₂, связанные с производством аккумуляторных батарей (оценки данного показателя в разных работах отличаются на порядок – от 30 до 500 кг CO₂ на кВт · ч ёмкости, большая часть оценок – в диапазоне 100–250 кг CO₂ на кВт · ч) [10];
- пробег автомобиля за жизненный цикл: чем длиннее эксплуатационная стадия, тем меньшее значение имеют выбросы, связанные с производством батареи.

Проведём оценку сравнительных выбросов CO₂ для ЭМ и автомобиля с ДВС на 1 км пробега на протяжении жизненного цикла с учётом указанных выше факторов.

Во-первых, если средний расход электроэнергии для ЭМ в разных исследовательских работах примерно одинаков (около 20 кВт · ч на 100 км пробега), то данные о потреблении бензина и дизельного топлива отличаются очень значительно. Это связано с тем, что одни исследователи используют в расчётах расход топлива в новых моделях автомобилей с ДВС, другие – среднее значение по стране (с учётом старых неэффективных моделей). Так как все актуальные модели электромобилей новые – большинство из них появилось в последние пять лет, мы считаем более корректным их сравнение с современными традиционными автомобилями. В настоящее время ключевые страны, на которые приходится 80% всех продаж личных автомобилей, регулируют первичный автомобильный рынок, устанавливая требования по предельным выбросам CO₂ или расходу моторного топлива. Актуальные значе-

ния данных ограничений, выраженные в литрах бензинового эквивалента (лбэ) на 100 км, составляют: 6.2 лбэ в США, 5.1 – ЕС, 6.7 – Китае, 5.3 – Индии, 4.9 – Японии, 6.5 – в Корею [14]. В России расход топлива наиболее эффективных моделей – 6 лбэ/100 км.

Во-вторых, при рассмотрении выбросов, связанных с выпуском аккумуляторной батареи, следует разделить на две составляющие: снабжение производства электроэнергией и обеспечение материалами, необходимыми для сборки батареи. Собственно производство – довольно энергоёмкий процесс, он требует 586 МДж/кВт · ч ёмкости [15]. Согласно данным [6], в 2018 г. наиболее типичная ёмкость аккумуляторной батареи в разных моделях ЭМ составляла 40 кВт · ч. Её изготовление требует 23440 МДж¹, что эквивалентно 6511 кВт · ч электроэнергии. Выпуск аккумуляторных батарей сосредоточен главным образом в четырёх странах: Китае (26% мощностей в 2016 г.), Японии (31%), Корею (15%) и США (20%) [17]. В таблице 1 представлены оценки выбросов CO₂, обусловленных потреблением электроэнергии при производстве батареи ёмкостью 40 кВт · ч в перечисленных странах (очевидно, объём выбросов будет разным, поскольку неодинакова топливная структура генерации электроэнергии): в Китае они составят порядка 4.2 т CO₂, Японии – 3.1 т, Корею – 3.2 т, в США – 2.8 т. Средневзвешенное значение – порядка 3.3 т CO₂ – применяется в расчётах для других стран. В таблице 2 дана оценка структуры массы аккумуляторной батареи с учётом используемых материалов, рассчитаны выбросы CO₂, связанные с обеспечением этими материалами, – они составляют порядка 1.1 т. Таким образом, совокупные выбросы CO₂ при производстве батареи ёмкостью 40 кВт · ч можно оценить в 4.4 т CO₂ (3.3 + 1.1). Эта величина вполне сопоставима с выбросами, связанными с производством автомобиля: около 4.8 т – для традиционного и 5.3 т CO₂ – для ЭМ [9].

В-третьих, что касается пробега за жизненный цикл, то, по нашему мнению, корректно учитывать такое расстояние, которое может быть пройдено электромобилем без замены батареи² (в случае её замены в расчёт необходимо включать выбросы, сопряжённые с производством дополнительной батареи). В этом отношении целесообразно ориен-

¹ Согласно данным [16], увеличение совокупной массы батареи и выбросов CO₂ по мере наращивания ёмкости может быть хорошо описано линейной функцией.

² Информации о реальном длительном опыте эксплуатации электромобилей пока очень мало. Вот один из примеров использования автомобиля Tesla Model S: замена первой батареи произошла после 312 тыс. км пробега, второй – после 209 тыс. км, третья (действующая) позволила пройти 203 тыс. км, деградировав при этом только на 10% [19]. То есть опыт эксплуатации практически идентичных батарей очень различается.

Таблица 1. Выбросы CO₂, связанные с выработкой электроэнергии, необходимой для производства аккумуляторной батареи ёмкостью 40 кВт · ч для электромобиля

| Показатели | Китай | Япония | Корея | США |
|---|-------|--------|-------|------|
| Необходимое потребление электроэнергии для производства батареи, кВт · ч | 6511 | | | |
| Потери электроэнергии при транспортировке, % | 5 | 4 | 3 | 5 |
| Необходимое производство электроэнергии с учётом потерь, кВт · ч, | 6847 | 6811 | 6719 | 6883 |
| в том числе на основе: | | | | |
| угля | 4587 | 2248 | 2822 | 2202 |
| газа | 205 | 2656 | 1545 | 2271 |
| нефти | 7 | 545 | 202 | 69 |
| Удельный расход углеродосодержащего топлива на выработку электроэнергии, г нэ/кВт · ч | | | | |
| уголь | 224 | 198 | 231 | 226 |
| газ | 179 | 182 | 153 | 145 |
| нефть | 160 | 150 | 150 | 159 |
| Расход углеродосодержащего топлива на выработку электроэнергии, кг нэ | | | | |
| уголь | 1028 | 445 | 652 | 498 |
| газ | 37 | 483 | 236 | 329 |
| нефть | 1 | 82 | 30 | 11 |
| Углеродоёмкость топлив, кг CO ₂ /кг нэ | | | | |
| уголь | | | 3.96 | |
| газ | | | 2.28 | |
| нефть | | | 3.07 | |
| Выбросы CO ₂ , связанные с выработкой электроэнергии для производства батареи, кг | 4156 | 3115 | 3214 | 2756 |
| Средневзвешенные выбросы CO ₂ , связанные с выработкой электроэнергии для производства батареи, кг | | | 3343 | |

Источник: оценки авторов с учётом данных энергетических балансов Международного энергетического агентства.

тироваться на срок гарантии, который дают производители. Большинство из них предлагают идентичные условия: гарантия даётся на 8 лет или 160 тыс. км (до первого события)³. Такие условия действуют для Nissan Leaf, Tesla Model 3⁴, BMW i3, Audi e-tron, Jaguar I-PACE. Именно это расстояние (160 тыс. км) было выбрано при расчётах в качестве значения пробега в течение жизненного цикла автомобиля.

³ Допускается частичная деградация батареи. Но производители гарантируют, что ёмкость батареи потеряет не более 30% начального запаса хода.

⁴ Для более дорогих моделей Tesla (Model S, Model X, Model 3 Long-Range) гарантия расширяется до 200 тыс. км пробега.

Итоговый результат сравнительной оценки выбросов CO₂⁵, связанных с использованием ав-

⁵ Определённые объёмы выбросов CO₂ создаются на стадии утилизации батарей. Однако данное направление в настоящее время переживает трансформацию, связанную с замещением пирометаллургической технологии на гидротермальную. Первая связана с разделением материалов батарей после их расплавления, вторая – с их вытягиванием при помощи различных кислот в специальных ваннах. Преимущество второго способа – пониженная теплоёмкость (температура процесса не превышает 90°C, тогда как для пирометаллургической технологии требуется температура порядка 1000°C). Наши оценки показывают, что энергозатраты на переработку одной батареи гидротермальным способом составляют около 17 кВт · ч. Выбросы CO₂, связанные с данным процессом, малы в расчёте на одну батарею (в пределах 20 кг), и ими вполне можно пренебречь.

Таблица 2. Масса материалов, используемых при производстве аккумуляторной батареи для электромобиля мощностью 40 кВт · ч, а также выбросы CO₂, связанные с их производством

| Используемый материал | Удельные значения на 1 кВт · ч ёмкости батареи | | Значения для батареи ёмкостью 40 кВт · ч | |
|-------------------------|--|-----------------------------|--|------------------------------|
| | Масса, г | Выбросы CO ₂ , г | Масса, кг | Выбросы CO ₂ , кг |
| Алюминий | 1767 | 5602 | 71 | 224 |
| Сталь | 1278 | 2368 | 51 | 95 |
| Высокоочищенный углерод | 113 | 338 | 5 | 14 |
| Кобальт | 526 | 3102 | 21 | 124 |
| Медь | 1429 | 4868 | 57 | 195 |
| Этиленкарбонат | 789 | 940 | 32 | 38 |
| Графит | 902 | 2425 | 36 | 97 |
| Гексофторофосфат лития | 113 | 2932 | 5 | 117 |
| Никель, марганец | 526 | 4098 | 21 | 164 |
| Н-метил-2-пирролидон | 865 | 38 | 35 | 2 |
| Поливинилденфторид | 150 | 1147 | 6 | 46 |
| Полипропилен | 789 | 1278 | 32 | 51 |
| Всего | 9248 | 27857 | 370 | 1114 |

Источник: оценки авторов на основе [18].

томобиля с ДВС и ЭМ⁶, приведён на рис. 1. Упомянутые на нём страны можно условно разделить на несколько групп. С точки зрения сокращения общемировых выбросов CO₂, использование электромобиля, безусловно, целесообразно в Норвегии, Франции, Великобритании, США, Корею. Россия также входит в эту группу благодаря высокой доле безуглеродных видов энергии и природного газа в структуре выработки электроэнергии. В Нидерландах и Германии при существующей структуре генерации значимого снижения выбросов CO₂ добиться не удастся. В Китае, Японии и Индии использование электромобиля сопровождается в настоящее время даже большими выбросами по сравнению с современными моделями традиционных автомобилей.

МАКРОЭКОНОМИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВИЭ И ЭМ

Итак, с позиций сокращения мировых выбросов CO₂, распространение низкоуглеродных технологий в большинстве стран целесообразно. Совершенно другой вопрос — насколько оно эффек-

⁶ Следует подчеркнуть, что эти выбросы не относятся к конкретной стране — они отражают общемировые выбросы, связанные с локальным использованием. Так, Норвегия импортирует электромобили, а это значит, что выбросы, связанные с производством автомобиля и батареи, окажутся за пределами страны. Германия производит некоторые модели электромобилей, но осуществляет импорт батарей, а значит, выбросы, связанные с их производством, происходят на территории страны-поставщика.

тивно с точки зрения социально-экономических последствий? Большинство исследовательских работ, формулирующих ответ на этот вопрос, построено на основе следующих постулатов:

- использование низкоуглеродных технологий приводит к сокращению сектора традиционной энергетики, что чревато негативными эффектами для стран, экономика которых в существенной степени опирается на экспорт углеводородов;
- низкоуглеродные технологии требуют масштабных инвестиций, что создаёт позитивный вклад в ВВП (как прямой, так и за счёт мультипликативных эффектов);
- развитие ВИЭ ведёт к росту цен на электроэнергию и ускорению инфляции, что увеличивает затраты бизнеса и домохозяйств;
- за счёт высокой удельной трудоёмкости и распределённого характера сферы ВИЭ будут созданы новые рабочие места, повысится занятость в развивающихся отраслях, что обеспечит позитивный эффект в виде увеличения доходов домохозяйств и, следовательно, конечного потребления;
- для стран, закупаящих углеводородные топлива на внешних рынках, позитивный эффект будет достигаться в виде экономии на импорте.

Комплексный анализ перечисленных эффектов приводит многих исследователей к идентичным выводам практически для всех стран: низкоуглеродные сценарии характеризуются повышенным ростом цен, занятости и ВВП. Например,

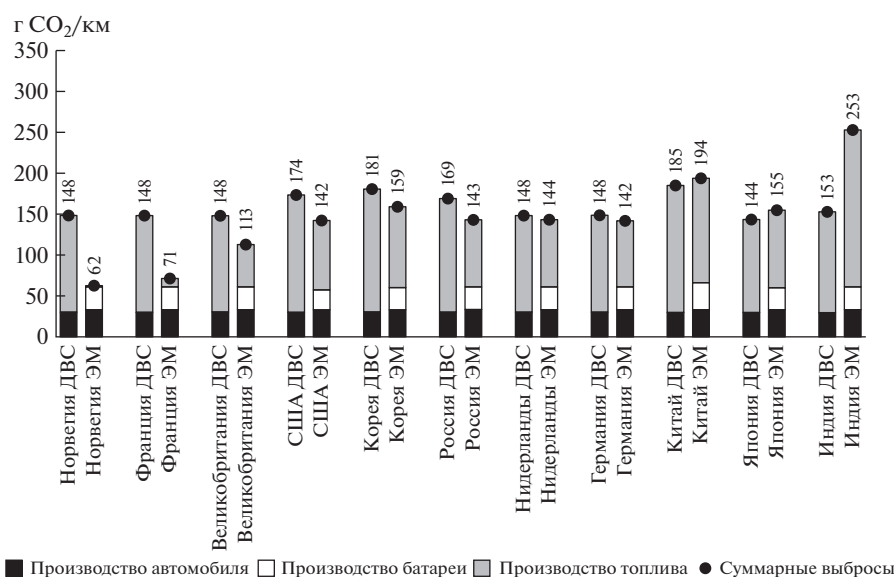


Рис. 1. Сравнительная оценка выбросов CO₂ на протяжении жизненного цикла изделия при использовании автомобиля с ДВС и электромобиля (ЭМ) в разных странах

Источник: оценки авторов.

оценки на глобальном уровне показывают, что реализация таких сценариев обеспечивает прирост мирового ВВП на 0.6–2% к 2030 г. и до 2.5% к 2050 г. Для США дополнительный прирост ВВП оценивается в 0.9–1.8% к 2030 г., для Китая – 0.2–3.7%, Индии – 0.9–2.2%, ЕС – 0.5–1%. Удорожание энергии приведёт к дополнительным расходам мировой экономики в размере 0.4% ВВП. В ряде стран реализация низкоуглеродных сценариев несёт риски снижения ВВП (Россия, Саудовская Аравия, Нигерия). При этом изменение благосостояния мирового населения, которое, помимо экономических индикаторов в виде показателей конечного потребления, учитывает также занятость, инвестиции в человеческий капитал и состояние окружающей среды, будет позитивным во всех без исключения странах [20–22]. В ряде работ указываются возможности получения положительных эффектов от развития собственного производства оборудования для ВИЭ или обеспечения манёвренными мощностями соседних регионов, ориентирующихся на ВИЭ [23, 24].

На примере Германии показаны возможные экономические риски низкоуглеродного развития. В целом до 2030 г. дополнительная величина ВВП оценивается в 2.5–3.1%, занятости – 0.5%, роста цен – 0.9%. Однако существует риск, что дополнительные расходы негативно повлияют на глобальную конкурентоспособность Германии, что приведёт к сокращению экспорта и наращиванию импорта продукции [25, 26]. Кроме того, в случае электрификации автотранспорта требуется увеличивать импорт, что будет оказывать

решающее воздействие на экономическую динамику. И если в краткосрочной перспективе дополнительные инвестиции в электрификацию обеспечат прирост ВВП, то уже в среднесрочной перспективе потребность в импорте нивелирует данный позитивный эффект, и итоговое изменение ВВП станет негативным [27].

В отношении реализации сценариев распространения низкоуглеродных технологий и их макроэкономических последствий для России существуют следующие принципиальные позиции.

- Основные риски для экономического роста в России носят внешний характер и связаны со сворачиванием экспорта энергоресурсов. Выполнение странами-участницами целей Парижского соглашения может привести к сокращению среднегодового темпа прироста ВВП России на 0.2–0.3 процентных пункта к 2030 г. При ужесточении климатической политики в мире потери российского ВВП составят уже 0.5 процентного пункта в 2035–2050 гг. Вместе с тем отказ от развития низкоуглеродных практик создаёт риски технологической отсталости России. Введение углеродного налога и направление собранных средств в диверсификацию экономики и на инвестиции в человеческий капитал способно ускорить рост ВВП в долгосрочной перспективе [28].

- Реализация сценария МГЭИК по недопущению к 2100 г. роста глобальной температуры более чем на 1.5°C относительно доиндустриального уровня с масштабным распространением низкоуглеродных технологий (в том числе в России)

приведёт к сокращению среднегодового темпа прироста ВВП России на 0.5 процентного пункта до 2045 г. Важнейшие негативные эффекты возникают вследствие сокращения выпуска и инвестиций в секторе добычи энергоресурсов, а также необходимости наращивания импорта низкоуглеродных технологий [29].

- При стремлении достичь цели, указанной в Парижском соглашении, российская экономика сможет развиваться с темпом не более 2% в год. При темпах роста ВВП, сопоставимых со среднемировыми, выбросы CO₂ уже к 2030 г. могут превысить предельную отметку в 75% уровня 1990 г. [30].

- Мнение о переходе на низкоуглеродную экономику как тормозе развития — это не вывод, а логическое допущение. Пристальное рассмотрение проблемы предполагает, помимо показателя ВВП, использование дополнительных индикаторов, которые учитывали бы эффекты потенциального улучшения климатического и экологического состояния окружающей среды. Затраты на низкоуглеродные решения приводят не только к росту цен, но также стимулируют технологическую модернизацию и повышают эффективность использования первичных ресурсов в экономике. Существует набор увязанных сценариев, при реализации которых Россия успешно добивается “парижских” целей и даже превосходит их [31].

- Борьба с изменением климата важна, но не выступает главным условием минимизации рисков для устойчивого роста экономики, а также качества и уровня жизни людей. Эффективная стратегия должна быть нацелена на разработку и реализацию комплекса взаимосвязанных мер, обеспечивающих достижение всех целей устойчивого развития, а не только борьбу с климатическими изменениями. В качестве приоритетов следует выделить: стимулирование экономического роста на базе повышения эффективности производства и ресурсопользования; снижение выбросов вредных веществ, опасных для окружающей среды и здоровья людей; адаптацию населения и экономики к изменению климата, а также смягчение негативных эффектов [32].

Во всех упомянутых выше работах используется преимущественно макроэкономический подход, но не уделяется особого внимания вопросам изменения структуры экономики, а именно — перераспределению потоков продукции разных отраслей под воздействием преобразований в технологических цепочках. Поэтому далее предлагается ещё один взгляд на последствия распространения низкоуглеродных технологий. В его основе — синтез межотраслевого подхода и описания конкретных используемых технологий с применением системы таблиц “затраты—выпуск” (за 2015 г.), разработанной в ИНП РАН [33].

Для наглядности объясним идею на примере распространения ЭМ. Мы имеем базовое уравнение межотраслевого подхода, которое связывает выпуск X , конечное потребление Y и матрицу прямых затрат A (E — диагональная единичная матрица):

$$X = (E - A)^{-1} \cdot Y. \quad (1)$$

Что происходит при замещении традиционных автомобилей электрическими аналогами? Наиболее очевидный эффект — снижение потребления нефтепродуктов в качестве моторного топлива для личных автомобилей, а также увеличение потребления электроэнергии. В терминах методологии “затраты—выпуск” это перераспределение относится к столбцу конечного потребления домашних хозяйств, а именно — снижению объёма использования продукции вида экономической деятельности (ВЭД) “Производство нефтепродуктов и кокса” и увеличению использования продукции ВЭД “Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха”. В 2016 г. потребление нефтепродуктов населением можно оценить в 38 млн т нефтяного эквивалента, из которых 30 млн т приходится на моторное топливо и 8 млн т — на прочие нужды. Также было потреблено 14 млн тэ электроэнергии, 43 млн тэ тепла и 47 млн тэ природного газа (итого 104 млн тэ, относящихся к ВЭД “Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха”). При этом, если происходит замещение, например, 50% автопарка электрическими аналогами, потребление нефтепродуктов сократится на 16 млн тэ, а потребление электроэнергии возрастёт на 4 млн тэ. На основе таких оценок, полученных при моделировании энергобаланса России, можно оценивать структурные сдвиги в столбце конечного потребления домашних хозяйств.

Дополнительные эффекты возникнут при локализации производства ЭМ, так как это создаст предпосылки для структурных сдвигов. Как известно, матрица коэффициентов прямых затрат, по сути, отражает технологическую структуру экономики, поэтому через изменение этих затрат можно описывать происходящие процессы, которые связаны с рядом принципиальных отличий ЭМ от автомобиля с ДВС. Электромобили имеют более высокий вес из-за наличия тяжёлой аккумуляторной батареи, что определяет больший расход материалов. Для уменьшения веса производители стремятся использовать при сборке больше цветных металлов вместо чёрных. В терминах методологии “затраты—выпуск” это означает замещение продукции ВЭД “Производство чёрных металлов” продукцией ВЭД “Производство цветных металлов” в столбце ВЭД “Производство транспортных средств и оборудования”.

Таблица 3. Оценка структуры физического веса автомобиля с ДВС и электромобиля (ЭМ) с учётом использования продукции разных видов экономической деятельности, кг

| Продукция по видам экономической деятельности | ДВС | ЭМ |
|--|------|------|
| “Производство чёрных металлов” и “Производство транспортных средств и оборудования” | 1270 | 905 |
| “Производство цветных металлов” | 150 | 405 |
| “Производство электрического оборудования” | 95 | 635 |
| Прочие виды экономической деятельности | 295 | 295 |
| Итого | 1810 | 2240 |

Источник: оценки авторов на основе характеристик автомобилей сопоставимого класса (Tesla Model S и BMW 5).

Вместо ДВС, систем хранения топлива и отвода отработавших газов, которые преимущественно производятся из чёрных металлов и относятся к продукции автомобилестроения, в ЭМ используются электродвигатели и батарея (последняя относится к электрическому оборудованию). В терминах методологии “затраты–выпуск” это означает снижение диагонального коэффициента и увеличение коэффициента ВЭД “Производство электрического оборудования” в столбце ВЭД “Производство транспортных средств и оборудования”. Масштабы изменения технологических коэффициентов можно оценить на основе сравнения структуры физического веса автомобиля с ДВС и ЭМ с учётом использования продукции разных ВЭД (табл. 3).

Рассмотрим сценарий, при котором производство легковых автомобилей в России полностью переориентируется на выпуск ЭМ, что позволит ежегодно замещать 3.4% современного автопарка, состоящего из автомобилей с ДВС, на электрические аналоги и в соответствующих пропорциях сокращать спрос на нефтепродукты в качестве моторных топлив, заменяя их электроэнергией. Адаптация в технологической цепочке производства приведёт к изменению коэффициентов прямых затрат в столбце ВЭД “Производство транспортных средств и оборудования”. Диагональный коэффициент снизится с 0.199 до 0.145 (на 27%), коэффициент ВЭД “Производство чёрных металлов” – с 0.129 до 0.094 (на 27%). Коэффициент ВЭД “Производство цветных металлов” увеличится с 0.028 до 0.073 (на 160%), коэффициент ВЭД “Производство электрического оборудования” – с 0.024 до 0.085 (на 255%).

На рисунке 2 представлена оценка изменения годового выпуска в экономике России по видам экономической деятельности и в зависимости от потребности в импорте по рассматриваемому сценарию. На основе такой оценки мы можем сделать следующие выводы. Во-первых, основные эффекты (по масштабам) связаны с изменениями не в структуре потребления топлива, а в

технологии производства автомобилей. Во-вторых, совокупное воздействие этих изменений на выпуск оказывается отрицательным и оценивается в –105 млрд руб. (в ценах 2015 г.). При этом важным негативным фактором окажется необходимость наращивания импорта, обусловленного преимущественно закупкой батарей. Таким образом, без решения проблемы импортной зависимости распространение ЭМ в России, с экономической точки зрения, представляется нерациональным (см. рис. 2).

Проанализируем также сценарий распространения ВИЭ в электроэнергетике. Особенность ВИЭ заключается в небольшом числе часов использования установленной мощности за год. Это означает, что для выработки одного и того же количества электроэнергии на основе ВИЭ по сравнению с традиционными топливами необходимо в несколько раз больше мощностей. Вместе с тем невысокая плотность энергетического потока ВИЭ приводит к увеличению массогабаритных параметров генерирующих установок, обуславливая существенно больший спрос на конструкционные материалы, что влечёт за собой дополнительные выбросы CO₂ на инвестиционной стадии. Замена даже 1% традиционной генерации (например, газовой, которая преобладает в России) на ВИЭ вызовет изменения в структуре экономики. Во-первых, произойдёт сокращение потребления газа в электроэнергетике. В терминологии “затраты–выпуск” это можно описать снижением коэффициента прямых затрат продукции ВЭД “Производство природного газа” на производство продукции ВЭД “Обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха”. Согласно нашим оценкам, при замещении 1% газовой генерации он снизится с 0.0462 до 0.0458. Во-вторых, увеличится использование материалов на инвестиционной стадии. При замещении 1% газовой генерации на солнечную потребуются дополнительно произвести 2210 тыс. т чёрных металлов, 857 тыс. т кремния и 89 тыс. т электрооборудования; в случае замещения на ветровую – 3732 тыс. т бетона, 66 тыс. т электрооборудования, 258 тыс. т поли-

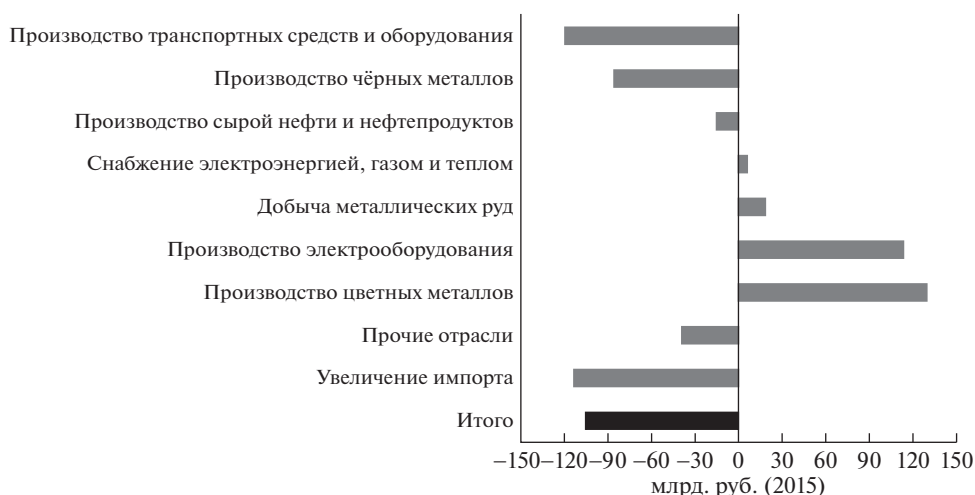


Рис. 2. Изменение годового выпуска в экономике России по видам экономической деятельности и потребности в импорте при полной переориентации производства легковых автомобилей на электромобили

Источник: оценки авторов.

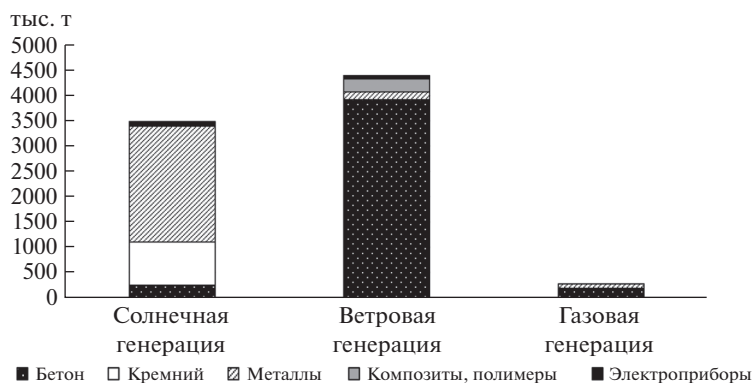


Рис. 3. Расход материалов на инвестиционной стадии по разным типам генерации для обеспечения 1% общероссийской выработки электроэнергии

Источник: оценки авторов на основе [34, 35].

меров и композитов (рис. 3). Моделирование перечисленных изменений реализуется путём изменения определённых показателей по ВЭД «Строительство», а именно — увеличения значения по данному ВЭД в столбце конечного потребления «Накопление основного капитала», а также одновременной корректировки коэффициентов прямых затрат в столбце ВЭД «Строительство».

Соответствующие оценки в случае замещения 1% газовой генерации на солнечную выглядят следующим образом. Дополнительное накопление основного капитала составит 260 млрд руб. (в ценах 2015 г.), в том числе: 83 млрд руб. на увеличение производства продукции ВЭД «Производство чёрных металлов», 97 млрд руб. — продукции ВЭД «Химическое производство», 80 млрд руб. — продукции ВЭД «Производство электрооборудования». В матрице прямых затрат в столбце ВЭД

«Строительство» коэффициент ВЭД «Производство чёрных металлов» увеличится с 0.0556 до 0.0642 (на 15%); коэффициент ВЭД «Химическое производство» — с 0.0126 до 0.0226 (на 80%); коэффициент ВЭД «Производство электрооборудования» — с 0.0137 до 0.0219 (на 60%).

Для случая перехода на ветровую генерацию получены следующие оценки. Дополнительное накопление основного капитала составит 198 млрд руб. (в ценах 2015 г.), в том числе: 120 млрд руб. на увеличение производства продукции ВЭД «Производство резиновых и пластмассовых изделий»; 18 млрд руб. — продукции ВЭД «Производство прочих неметаллических минеральных продуктов»; 60 млрд руб. — продукции ВЭД «Производство электрооборудования». В матрице прямых затрат в столбце ВЭД «Строительство» коэффициент ВЭД «Производство резиновых и пласт-

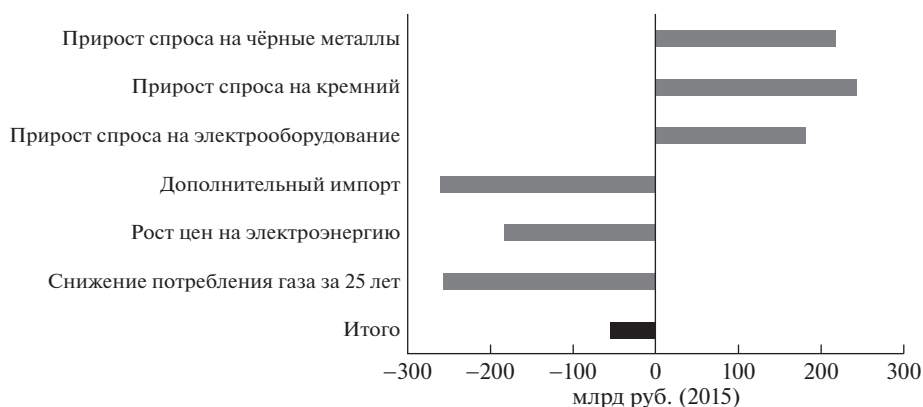


Рис. 4. Факторный анализ изменения выпуска в России при переориентации 1% производства электроэнергии с природного газа на солнечную энергию

Источник: оценки авторов.

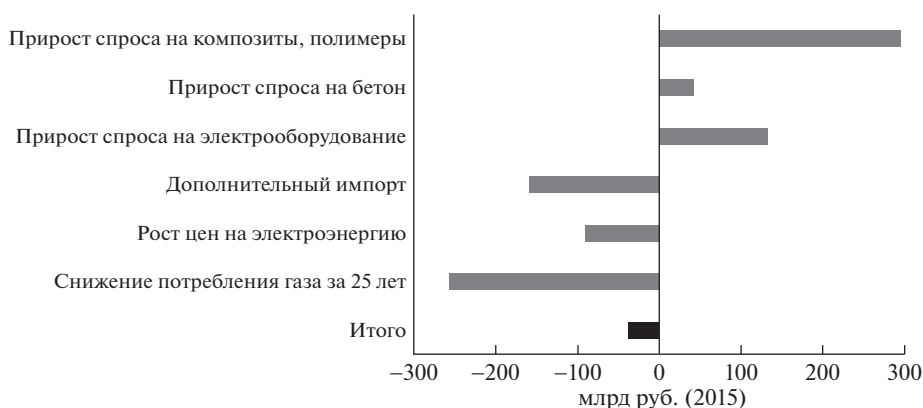


Рис. 5. Факторный анализ изменения выпуска продукции в России при переориентации 1% производства электроэнергии с природного газа на ветровую энергию

Источник: оценки авторов.

массовых изделий” увеличится с 0.0072 до 0.0195 (на 170%); коэффициент ВЭД “Производство прочих неметаллических минеральных продуктов” — с 0.11 до 0.117 (на 6%); коэффициент ВЭД “Производство электрооборудования” — с 0.0137 до 0.0199 (на 45%).

Оценки макроэкономических эффектов замещения газовой генерации на ВИЭ для обеспечения ими 1% спроса на электроэнергию представлены на рисунках 4 и 5. Расчёты показывают, что с учётом межотраслевых связей дополнительное потребление чёрных металлов, кремния и электрооборудования в случае перехода на солнечную генерацию обеспечит прирост выпуска в российской экономике на 646 млрд руб. (в ценах 2015 г.). Однако при этом потребуются прирост импорта, который вызовет сокращение выпуска на 260 млрд руб. Кроме того, для обеспечения окупаемости инвестиций в солнечную генерацию потребуется увеличить цены на электроэнергию

(на 0.2 руб./кВт · ч), что приведёт к сокращению общего выпуска в экономике на 183 млрд руб. Следует также учитывать, что свёртывание добычи и поставки природного газа в электроэнергетику, связанное с его замещением, обернётся недополучением 257 млрд руб. в течение всего жизненного цикла ВИЭ (25 лет). Таким образом, по нашей оценке, совокупное изменение выпуска окажется отрицательным и составит — 55 млрд руб. (рис. 5).

В случае перехода на ветровую генерацию дополнительное потребление бетона, полимеров, композитов и электрооборудования обеспечит прирост выпуска на 470 млрд руб. Дополнительный импорт вызовет сокращение выпуска на 159 млрд руб., а требуемый рост цены электроэнергии на 0.1 руб./кВт · ч — на 92 млрд руб. С учётом выпадающего потребления газа совокупное изменение выпуска также окажется отрицательным и составит — 38 млрд руб.

Предложенный подход, безусловно, не может охватить весь спектр изменений экономической динамики, особенно с учётом транспортировки, торговли и услуг. Однако он позволяет добавить ещё одно измерение в процесс оценки макроэкономических эффектов распространения новых технологий, а конкретно — учёт их ресурсо- и материалоёмкости.

Полученные оценки наглядно показывают, что зависимость России от технологического импорта служит критической преградой для применения низкоуглеродных технологий на современном этапе — это экономически не эффективно. Отсюда следует вывод: наравне с внешними вызовами, возникающими вследствие международной борьбы с изменением климата и касающимися возможного сворачивания экспорта российских энергоресурсов, возникают также и внутренние риски, обусловленные неготовностью структуры российской экономики к распространению низкоуглеродных технологий. Климатическая политика России должна это учитывать и предлагать набор таких взаимоувязанных мер (институциональных, экономических, структурно-технологических), которые нивелировали бы негативные последствия её реализации для социально-экономического развития страны. В первую очередь необходимы меры по локализации новых энергетических технологий и организации соответствующих производств на отечественной основе. Учитывая, что данный рынок в России находится на начальных этапах формирования, реализация решительных оперативных действий по запуску процессов импортозамещения может стать его органичным и естественным дополнением, которое сыграет позитивную роль в долгосрочной перспективе.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-00-00600 (18-00-00599).

ЛИТЕРАТУРА

- IPCC (2019). Special Report Global Warming of 1.5°C. <https://www.ipcc.ch/sr15>
- OECD (2015). The Economic Consequences of Climate Change. Paris, OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264235410-en> https://www.oecd-ilibrary.org/environment/the-economic-consequences-of-climate-change_9789264235410-en
- Оценка макроэкономических последствий изменений климата на территории Российской Федерации на период до 2030 г. и дальнейшую перспективу / Под ред. В.М. Катцова, Б.Н. Порфирьева. М.: ДАРТ, 2011.
- IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland.
- UNEP (2016). Green Energy Choices: The benefits, risks and trade-offs of low-carbon technologies for electricity production. Report of the International Resource Panel / E.G. Hertwich, J. Aloisi de Lardere, A. Arvesen et al (eds.). <https://www.resourcepanel.org/reports/green-energy-choices-benefits-risks-and-trade-offs-low-carbon-technologies-electricity>
- IEA (2019). Global EV Outlook 2019. <https://www.iea.org/publications/reports/globalev-outlook2019>
- Nealer R., Reichmuth D., Anair D. Cleaner Cars from Cradle to Grave. How Electric Cars Beat Gasoline Cars on Lifetime Global Warming Emissions. Union of concerned scientists, 2015. <https://www.ucsusa.org/resources/cleaner-cars-cradle-to-grave>
- Asaithambi G., Treiber M., Kanagaraj V. Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. 2017. https://www.researchgate.net/publication/320620393_Life_Cycle_Assessment_of_Conventional_and_Electric_Vehicles
- Бердин Г.В. Конкуренция электротранспорта и транспорта на природном газе на рынке Германии. Презентация ПАО Газпром. Март 2018. В рукописи.
- Hall D., Lutsey N. Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions. ICCT, 2018. https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV-life-cycle-GHG_ICCT-Briefing_09022018_vF.pdf
- Wietschel M., Kühnbach M., Rüdiger D. Die aktuelle Treibhausgasemissionsbilanz von Elektrofahrzeugen in Deutschland. Fraunhofer ISI, 2019. <https://www.isi.fraunhofer.de/en/presse/2019/presseinfo-07-elektroautos-klimabilanz.html>
- Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial. Agora Verkehrswende, 2019. https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf
- Buchal C., Karl H.-D., Sinn H.-W. Kohlemotoren, Windmotoren und Dieselmotoren: Was zeigt die CO₂-Bilanz? // ifo Schnelldienst, 2019. <https://www.ifo.de/DocDL/sd-2019-08-sinn-karl-buchal-motoren-2019-04-25.pdf>
- ICCT. Chart library: Passenger vehicle fuel economy. <https://theicct.org/chart-library-passenger-vehicle-fuel-economy>
- Ellingsen L.A.W., Majeau Bettez G., Singh B. et al. Life cycle assessment of a lithium-ion battery vehicle pack // Journal of Industrial Ecology. 2014. V. 18(1). P. 113–124.
- Ambrose H., Kendall A. Effects of battery chemistry and performance on the life cycle greenhouse gas intensity of electric mobility // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2016. V. 47. P. 182–194.

17. *Chung D., Elgqvist E., Santhanagopalan S.* Automotive Lithium-ion Cell Manufacturing: Regional Cost Structures and Supply Chain Considerations. Clean Energy Manufacturing Analysis Center, 2016. <https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/66086.pdf>
18. *Romare M., Dahllöf L.* The life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions from lithium-ion batteries. IVL Swedish Environmental Research Institute, 2017. <https://www.ivl.se/download/18.5922281715bdaebede9559/1496046218976/C243+The+life+cycle+energy+consumption+and+CO2+emissions+from+lithium+ion+batteries+.pdf>
19. A 450,000 mile TESLA Model S?! Detailed review & cost analysis. <https://youtu.be/rhbD44jXffY>
20. IRENA (2019). Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050. <https://www.irena.org/DigitalArticles/2019/Apr/-/media/652AE07BBAAC407ABD1D45F6BBA8494B.ashx>
21. IRENA (2016). Renewable energy benefits: Measuring the economics. https://www.irena.org/document-downloads/publications/irena_measuring-the-economics_2016.pdf
22. OECD/IEA and IRENA (2017). Perspectives for the Energy Transition: Investment Needs for a Low-Carbon Energy System. <https://webstore.iea.org/insights-series-2018-perspectives-for-the-energy-transition-investment-needs-for-a-low-carbon-energy-system>
23. Danish Ministry of Energy, Utilities and Climate (2018). Denmark: energy and climate pioneer. https://en.efkm.dk/media/12032/denmark_energy_and_climate_pioneer_pdfa.pdf
24. *Egging R., Tomasgard A.* Norway's role in the European energy transition // Energy Strategy Reviews. 2018. V. 20. P. 99–101.
25. *Blazejczak J., Braun F.G., Edler D., Schill W.-P.* Economic effects of renewable energy expansion: a model-based analysis for Germany // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. V. 40. P. 1070–1080. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.134>
26. *Lutz C., Flaute M., Lehr U.* Macroeconomic effects of energy transition. Paper for IIOA Conference. 2019. https://www.iioa.org/conferences/27th/papers/files/3606_20190430041_Lutzetal.macroeffects.pdf
27. *Mönnig A., Schneemann C., Weber E. et al.* Electromobility 2035: Economic and labour market effects through the electrification of powertrains in passenger cars. IAB-Discussion Paper 8, 2019. <http://do-ku.iab.de/discussionpapers/2019/dp0819.pdf>
28. *Макаров И.А., Чен Х., Пальцев С.В.* Последствия Парижского климатического соглашения для экономики России // Вопросы экономики. 2018. № 4. С. 76–94.
29. *Shirov A.A., Kolpakov A.Yu.* Macroeconomic impact of the energy technologies changes in Russia: Input-Output approach. Presentation for IIOA Conference 2019. <https://ecfor.ru/publication/macroeconomic-impact-of-the-energy-technologies-in-russia-input-output-approach>
30. *Широв А.А., Колпаков А.Ю.* Экономика России и механизмы глобального климатического регулирования // Журнал Новой экономической ассоциации. 2016. № 4. С. 87–110.
31. Затраты и выгоды низкоуглеродной экономики и трансформации общества в России. Перспективы до и после 2050 г. / Под ред. И.А. Башмакова. М.: ЦЭНЭФ. 2014. https://wwf.ru/upload/iblock/8a2/04_zatraty_i_vygody_nizkouglerodnoi_ekonomiki.pdf
32. *Porfiriev B.N.* Economic Dimension of the Climate Challenge to Russia's Sustainable Development // Herald of the RAS. 2019. V. 2. P. 134–139; *Порфирьев Б.Н.* Экономическое измерение климатического вызова развитию России // Вестник РАН. 2019. № 4. С. 400–407.
33. *Узяков М.Н., Маслов А.Ю., Губанов А.Ю.* О разработке обновлённой версии рядов межотраслевых балансов РФ в постоянных и текущих ценах за 1980–2004 гг. // Научные труды ИМП РАН. 2006. Т. 4, С. 648–657. <https://ecfor.ru/publication/o-razrabotke-obnovlennoj-versii-ryadov-mezhotraslevyhbaltansov>
34. *Engström S., Lyrner T., Hassanzadeh M. et al.* Tall towers for large wind turbines. Report from Vindforsk project V-342 Höga torn för vindkraftverk, 2010. <https://ru.scribd.com/document/339378375/10-48-rapport-screen-pdf>
35. *Mitavachan H., Gokhale A., Srinivasan J.* A case study of 3-MW scale grid-connected solar photovoltaic power plant at Kolar. 2011. <https://ru.scribd.com/document/174353088/A-case-study-of-3-MW-scale-grid-connected-solar-photovoltaic-power-plant-at-Kolar-Karnataka>