

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ДИФфуЗИИ НОВЫХ АВТОТРАНСПОРТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДОЛОГИИ КРИВЫХ ОБУЧЕНИЯ*

Светлана Валерьевна РАТНЕР^а*, Валерий Викторович ИОСИФОВ^б^а доктор экономических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории экономической динамики и управления инновациями, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Российская Федерация
lanaratner@ipu.ru^б кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машиностроения и автомобильного транспорта, Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Российская Федерация
iosifov_v@mail.ru

* Ответственный автор

История статьи:

Принята 21.02.2017

Принята в доработанном виде

06.03.2017

Одобрена 17.03.2017

Доступна онлайн 27.04.2017

УДК 004.94:620.9

JEL: O18, O33, Q42

Аннотация

Предмет. Одной из наиболее актуальных проблем развития современных городских агломераций является оптимизация структуры и технологического обеспечения транспортных систем. В качестве варианта решения этой проблемы в литературе предлагается развитие автотранспорта на электрической тяге, однако в научной среде до сих пор не сложилось однозначного понимания, являются ли электромобили лучшей альтернативой традиционным транспортным средствам с двигателями внутреннего сгорания по экологическим показателям.**Цели.** Разработка и апробация на примере Краснодарского края метода прогнозирования экологических эффектов диффузии электромобильных технологий, в котором учитывается прогресс в развитии замещаемой (традиционные автомобили с двигателями внутреннего сгорания) и замещающей (электромобили) технологии.**Методология.** В качестве методологической основы используется теория обучения, широко применяемая при прогнозировании технико-технологического развития.**Результаты.** По расчетам общий объем выбросов от личного автомобильного транспорта при повышении энергоэффективности автомобилей с двигателями внутреннего сгорания и росте уровня проникновения электромобилей снизится к 2025 г. на 9,5% от уровня 2015 г., даже несмотря на существенный рост уровня автомобилизации (почти на 65%). Таким образом, широкое распространение электромобильных технологий является предпочтительным с экологической точки зрения.**Выводы.** Предложенный подход к прогнозированию экологических эффектов диффузии электромобильных технологий позволяет оценить сокращение объемов выбросов от автомобильного транспорта в любом регионе при условии сохранения направления и скорости следующих основных тенденций: роста уровня энергоэффективности и экологичности традиционных автомобилей с двигателями внутреннего сгорания, роста уровня автомобилизации населения России и снижения стоимости электромобилей. Дополнительные воздействия стимулирующих и дестимулирующих политических мер в данной модели не учитываются.**Ключевые слова:** наземный транспорт, инновационные транспортные технологии, электромобили, возобновляемая энергетика, энергоэффективность

© Издательский дом ФИНАНСЫ и КРЕДИТ, 2017

Введение

Одной из наиболее актуальных проблем развития современных городских агломераций является оптимизация структуры и технологического обеспечения транспортных систем.

Автомобильный транспорт, получивший широкое распространение как в развитых, так и в развивающихся странах, наряду с такими очевидными преимуществами, как мобильность и комфорт имеет и столь же очевидные недостатки, среди которых на первое место традиционно ставятся негативные экологические эффекты. Выхлопные газы двигателя внутреннего сгорания содержат около 100 вредных для здоровья

человека веществ, в том числе высокотоксичные оксиды азота, оксид углерода (продукт химического недожога топлива).

Продукт полного сгорания топлива – диоксид углерода или углекислый газ CO₂, являясь в принципе нетоксичным веществом, тем не менее оказывает пагубное воздействие на климатические изменения на планете.

Несмотря на существенное повышение уровня энергоэффективности и экологичности современных автомобилей и ужесточение требований к стандартам автомобильного топлива, проблема загрязнения воздушных бассейнов крупных городов, в том числе и российских, остается актуальной [1, 2].

* Исследование выполнено при поддержке РФФИ, проект № 17-06-00390.

В качестве одного из вариантов решения этой проблемы в литературе предлагается развитие автотранспорта на электрической тяге, в частности электромобилей [3]. За последнее десятилетие технологии производства электромобилей перешли от стадии опытного производства к серийному, в некоторых странах уровень проникновения электромобилей (доля от числа новых продаж) в 2015 г. составил 10–20%¹.

Однако в научной среде до сих пор не сложилось однозначного понимания, являются ли электромобили лучшей альтернативой традиционным автомобилям с двигателями внутреннего сгорания по экологическим показателям [4–11], как переход к широкому использованию электромобилей может сказаться на локальных и глобальных энергетических системах [12–14], развитии поддерживающих отраслей экономики [15].

Представленные в российской и зарубежной научной литературе работы, как правило, рассматривают экологические, экономические и другие эффекты диффузии электромобильных технологий в статике, не учитывая (или учитывая в ограниченном масштабе) прогресс в развитии как самих электромобильных технологий, так и в развитии традиционных автомобилей с двигателями внутреннего сгорания [7, 9–11, 16].

Лишь немногие работы исследуют динамику развития не только основных (традиционные автомобили) и замещающих технологий (электромобили или автомобили на топливных элементах), но и обеспечивающих технологий (технологий электрогенерации, рифоминга метана и т.д.).

Целью нашего исследования является разработка и апробация на примере модельного региона метода прогнозирования экологических эффектов диффузии электромобильных технологий, в котором учитывается прогресс в развитии замещаемой (традиционные автомобили с двигателями внутреннего сгорания) и замещающей (электромобили) технологий. В качестве методологической основы используется теория обучения, впервые предложенная в работе [17], и в настоящее время широко используемая при прогнозировании технико-технологического развития [18].

Информационной базой исследования послужили аналитические обзоры Агентства по защите окружающей среды США (United States Environmental Protection Agency, EPA), Мирового Энергетического Агентства (International Energy Agency, IEA), Министерства экономики, торговли и промышленности Японии (Ministry of Economy, Trade and Industry, METI).

Модели кривых обучения используются для прогнозирования экономических (стоимость отдельных элементов и готовой продукции) и экологических (выбросы) эффектов всех исследуемых технологий: традиционных и усовершенствованных; основанных на двигателях внутреннего сгорания; альтернативных автомобильных технологий (на электротяге); технологий генерации электроэнергии (сопутствующая для развития автомобилей на электротяге).

В качестве модельного региона рассматривается Краснодарский край, как регион с одним из наиболее высоких уровней автомобилизации населения, сложной экологической обстановкой в крупных городах (в том числе курортных), высокой плотностью населения и современной структурой генерации электроэнергии (основное топливо – природный газ).

Моделирование экологических эффектов от роста уровня автомобилизации населения при нулевой диффузии электромобильных технологий

Математическая модель, отражающая основные положения теории обучения в приложении к энергетическим технологиям имеет следующий вид²:

$$\begin{aligned} SC &= a \times CC^{-b}; \\ \log(SC) &= \log(a) + (-b) \log(CC); \\ TC &= \int_0^{CC} a \times CC^{-b} dCC = \frac{a}{1-b} CC^{1-b}; \\ PR &= 1 - LR = 2^{-b}, \end{aligned} \quad (1)$$

где SC – удельная стоимость (стоимость на единицу мощности);

a – коэффициент единичной удельной стоимости (удельная стоимость, когда объем мощности достигает делимой единицы);

CC – кумулятивная мощность;

¹ IEA. Global EV Outlook 2016. Beyond one million electric cars. International Energy Agency, Paris, France, 2016. URL: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/global_EV_outlook_2016.pdf

² Experience curves for energy technology policy. International Energy Agency, IEA, Paris, France, 2000.

b – коэффициент эластичности обучения;

TC – кумулятивная стоимость;

PR – темп технологического прогресса;

LR – темп обучения единичная удельная стоимость (удельная стоимость, когда мощность достигает объема, делимого на единицу мощности).

Основание логарифма в формуле (1) не указано в явном виде, так как представленная модель описывает общий вид закономерности развития новых технологий: накопление опыта в производстве (learning-by-doing) приводит к снижению себестоимости продукции.

Количественные параметры модели, в том числе основание логарифма, конкретизируются на основании статистических данных. В этой модели удельная стоимость является функцией только одного аргумента – кумулятивной мощности, которая в данном случае отражает весь накопленный в процессе развития технологии опыт.

В последние годы широкое распространение в литературе получили также модели, в которых в качестве зависимой переменной выступает не стоимость произведенной продукции по новой технологии, а уровень других ее технико-экономических параметров (энергоэффективность, углеродоемкость, коэффициент преобразования энергии и т.д.) [18].

В качестве независимой переменной при этом может выступать, как и в предыдущем случае, кумулятивный объем производства или кумулятивный объем инвестиций в исследования и разработки, направленные на совершенствование данной технологии. В последнем случае модель (1) описывает эффект обучения в исследованиях (learning-by-researching).

В некоторых источниках (например, в работе [19]) рассматриваются двухфакторные модели зависимости технико-экономических параметров диффундирующей технологии от накопления опыта в производстве и исследованиях.

Будем использовать подход, предложенный в работе [18], для описания зависимости уровня экологичности автомобильных технологий с двигателями внутреннего сгорания от накопления опыта в производстве. В качестве независимой переменной в модели кривой обучения примем кумулятивный объем производства автомобилей. Тогда в простейшем случае получим оценки

эффекта обучения в производстве по следующей модели:

$$C(Q) = C_1(1 - \lambda)^{\log_2 Q}, \quad (2)$$

где C_1 – исходный уровень экологичности автомобиля с двигателем внутреннего сгорания (удельные выбросы);

$C(Q)$ – удельные выбросы (уровень экологичности) в конце анализируемого периода;

Q – кумулятивный объем производства;

λ – оцениваемый темп обучения в повышении экологичности.

Решение уравнения (1) относительно λ позволяет оценить темп обучения в производстве и интерпретировать его как снижение удельных выбросов на $\lambda\%$ при удвоении кумулятивного объема производства.

Учитывая тот факт, что ведущие мировые производители автомобилей, как правило, являются компаниями с наиболее высоким уровнем инвестиций в исследования и разработки, значение λ можно интерпретировать не только как темп обучения в производстве, но как параметр, отражающий совместное действие эффекта обучения в производстве и эффекта обучения в исследованиях.

Для получения прогнозных оценок роста энергоэффективности традиционных автомобилей (с двигателями внутреннего сгорания) используем данные по динамике удельных выбросов CO_2 и удельном расходе топлива для модельного ряда автомобилей производства США 1975–2013 гг. (рис. 1) и данные по объемам производства (рис. 2), представленные в докладе Агентства по защите окружающей среды США³.

Как видно из графика, представленного на рис. 1, выбросы загрязняющих веществ автомобилями в пересчете на CO_2 за исследуемый период снизились почти в два раза. Наиболее заметное снижение удельных выбросов (выбросов на единицу пробега) произошло с 1975 по 1987 г., затем внимание американских производителей было переключено на создание более мощных автомобилей без существенного снижения уровня экологичности [20], а с 2004 г. вопросы экологии и энергоэффективности вновь стали приоритетными.

³ EPA. Light-Duty Automotive Technology, Carbon Dioxide Emissions, and Fuel Economy Trends: 1975 Through 2013. United States Environmental Protection Agency, 2013.

Общий объем производства автомобилей в США за 1975–2013 гг. оценивается в 518 250 тыс. шт. Решение уравнения (2) позволяет оценить темп обучения в процессе производства автомобилей с двигателями внутреннего сгорания в 3%. Это означает, что при удвоении кумулятивного объема производства уровень экологичности автомобиля, измеряемый как выбросы загрязняющих веществ в пересчете на CO₂ на единицу пробега, повышается на 3% (то есть удельные выбросы снижаются на 3%).

Используем полученные оценки темпов обучения для прогнозирования динамики уровня экологичности автомобилей с двигателями внутреннего сгорания в будущем (до 2025 г.), приняв за исходное значение удельных выбросов 230 г/км, что соответствует средним оценкам модельного ряда 2013 г.

Заметим, что в приложении к реальной ситуации с выбросами в любом российском регионе (в том числе и в выбранном для моделирования Краснодарском крае) данные исходные предположения являются существенно заниженными, так как в структуре автомобильного парка России преобладают устаревшие модели автомобилей с худшими экологическими характеристиками [2].

Для прогнозирования динамики уровня автомобилизации населения модельного региона будем использовать модель, основанную на логистической кривой, корректность применения которой доказана в работе [21].

Предполагая, что текущий уровень автомобилизации в регионе соответствует нижней части логистической кривой, сведем задачу прогнозирования данного параметра к экстраполяции экспоненциального тренда:

$$A = 122,17 \exp(0,05 \text{ year}),$$

где A – количество автомобилей;

year – номер года от начала периода наблюдения.

Тогда динамику роста количества автомобилей, находящихся в личном владении населения в Краснодарском крае, можно будет оценить, как это представлено на *рис. 3*.

Прирост количества автомобилей в регионе к 2025 г. относительно уровня 2015 г. составит более 1 073 тыс. ед., что при неизменном уровне экологичности автомобилей (даже самом высоком на настоящее время) может привести к

увеличению объемов выбросов загрязняющих веществ в пересчете на CO₂ более чем на 4 120 тыс. т. Однако с учетом роста уровня экологичности автомобилей с прогнозируемыми темпами прирост годового объема выбросов составит 2 650 тыс. т (*рис. 4*).

Моделирование экологических эффектов от роста уровня автомобилизации населения при темпах диффузии электромобильных технологий, соответствующих ее прогрессу

Далее применим модель кривых обучения для прогнозирования роста энергоэффективности автомобилей на электрической тяге. В качестве независимой переменной в формуле (2) рассмотрим кумулятивное количество используемых автомобилей в мире как аналог кумулятивного объема производства (*рис. 5*).

В качестве зависимой переменной примем стоимость батарей для электромобиля как основной фактор стоимости всего электромобиля. Кроме того, рассмотрим модель (2), где в качестве зависимой переменной используется энергетическая емкость батареи как показатель технологического уровня электромобиля. Для проведения оценок используем статистические данные Мирового энергетического агентства (*рис. 6*).

Решение уравнения (1) для каждой пары зависимых и независимых переменных, определенных ранее, позволяет получить следующие оценки темпов прогресса электромобильных технологий:

- темп обучения в процессе производства автомобилей на электротяге, измеренный в снижении его стоимости, составляет 10%, то есть при удвоении кумулятивного объема производства удельная стоимость батареи (долл./кВт•ч) сокращается на 10%;
- темп обучения, измеренный в повышении технических характеристик электромобиля (повышение емкости батареи), составляет 15%, то есть при удвоении кумулятивного объема производства удельная емкость батареи (Вт•ч/л) повышается на 15%.

Оба параметра – емкость батареи электромобиля и ее стоимость – оказывают непосредственное влияние на уровень распространенности электромобилей.

Повышение емкости электромобиля увеличивает дистанцию его пробега без подзарядки, что

расширяет радиус использования электромобилей и зону покрытия специальных заправочных станций. Снижение стоимости всего электромобиля линейно зависит от снижения стоимости его батареи. Поэтому для России, как страны, не являющейся в настоящее время производителем электромобилей, оценки уровня диффузии электромобильных технологий в зависимости от роста их технико-экономических параметров, в целом являются справедливыми.

Для расчетов будем использовать нижнюю оценку темпов диффузии электромобильных технологий (10% при удвоении мирового кумулятивного объема производства), полагая, что стоимостной барьер диффузии данного вида технологий является наиболее значимым.

Темпы роста мирового кумулятивного объема производства электромобилей будем оценивать как среднее значение прогнозов, обозначенных в Парижской декларации по автомобильному транспорту и климатическим изменениям⁴, прогнозах Мирового энергетического агентства⁵, министерства экономики, торговли и промышленности Японии⁶ и Организации экономического сотрудничества и развития⁷. Среднее значение прогнозируемых годовых темпов роста мирового производства электромобилей, по их данным, составляет 10–12%. Тогда, решая рекурсивное уравнение, получим, что за период до 2025 г. кумулятивное мировое производство V_{cum} удвоится (относительно уровня 2015 г.) как минимум четыре раза – в 2016, 2018, 2021 и 2024 гг.:

$V_{cum} = \sum V_t, t = 2015, \dots, 2025$, при $V_t = 1,1 V_{t-1}$ для всех $t = 2016, \dots, 2015$.

Это означает, что стоимость электромобилей может снизиться к 2025 г. по сравнению с уровнем 2015 г. на 40%. С учетом линейного роста уровня диффузии электромобилей до 40% к 2025 г. изменение объема выбросов от автотранспорта в исследуемый период может иметь тенденцию, представленную на *рис. 7*.

⁴ Paris Declaration on Electro-Mobility and Climate Change and Call to Action. UNFCCC, Paris, France, 2015.

⁵ IEA. Energy Technology Perspectives. International Energy Agency, Paris, France, 2016.

⁶ METI. Compilation of the road map for EVs and PHVs toward the dissemination of electric vehicles and plug-in hybrid vehicles. Ministry of Economy, Trade and Industry, Japan, 2016.

⁷ OECD. Domestic incentive measures for environmental goods with possible trade implications: Electric vehicles and batteries. Organisation for Economic Co-operation and Development, 2015.

Однако сокращение объемов выбросов от автомобильного транспорта может быть нивелировано увеличением объемов выбросов от источников генерации электрической энергии (например, тепловых электростанций), которые должны нарастить объемы генерируемой энергии и покрыть растущий спрос, создаваемый электромобилями.

При текущем уровне энергоэффективности электромобилей (по данным эксплуатационных характеристик Tesla Model S, это 0,18 кВт·ч на 1 км пробега) рост спроса на электроэнергию в модельном регионе будет расти так, как это представлено на *рис. 8*.

Учитывая, что текущий объем генерации электроэнергии на территории региона составляет 11 700 млн кВт·ч в год, рост спроса на электроэнергию составит к 2025 г. около 6,5%, что не может быть обеспечено за счет повышения коэффициента использования установленных мощностей.

Примем текущий уровень углеродоемкости электрогенерации равным 0,46 кг/кВт·ч, что соответствует удельным выбросам Адлерской ТЭС, использующей для производства электроэнергии наиболее новые и энергоэффективные парогазовые генераторы⁸. Данные по удельным выбросам другой крупной ТЭС модельного региона – Краснодарской – в открытом доступе отсутствуют, однако, учитывая, что на ней также применяются парогазовые технологии генерации энергии, углеродоемкость электрогенерации по краю в среднем можно считать 0,46 кг CO₂/кВт·ч. Тогда при сохранении существующей структуры электрогенерации и текущего уровня энергоэффективности генерирующих мощностей дополнительный прирост объема выбросов на территории региона за счет роста объемов генерации энергии будет иметь динамику, представленную на *рис. 9*. Общая динамика объемов выбросов также представлена на *рис. 9*.

Таким образом, согласно проведенным расчетам общий объем выбросов от личного автомобильного транспорта при повышении энергоэффективности автомобилей на двигателях внутреннего сгорания и росте уровня проникновения электромобилей снижается к 2025 г. на 9,5% от уровня 2015 г. даже несмотря на

⁸ Время вызовов, время перемен. Годовой отчет ОГК-2 за 2015 г. URL: <http://www.ogk2.ru/upload/iblock/051/051da51bd1c9587af3ce06d1fab07ca7.pdf>

существенный рост уровня автомобилизации (почти на 65%). То есть даже при использовании наилучших оценок уровня экологичности традиционных автомобилей и сохранении существующих темпов обучения в производстве и исследованиях, а также существующей структуры электрогенерации широкое распространение электромобильных технологий является более предпочтительным с экологической точки зрения.

Выводы

Полученные прогнозные оценки экологических эффектов диффузии электромобильных технологий учитывают сразу несколько разнонаправленных тенденций: рост уровня энергоэффективности и экологичности традиционных автомобилей с двигателями внутреннего сгорания, рост уровня автомобилизации населения России, снижение стоимости и как следствие – рост уровня распространенности электромобилей. Все эти тенденции сложились за последние 10–20 лет в мировом масштабе и в настоящее время вероятность их сохранения в среднесрочной перспективе может быть оценена как высокая.

Существующий инфраструктурный барьер диффузии электромобильных технологий в России (отсутствие необходимой инфраструктуры подзарядки электромобилей) в ближайшем будущем может быть достаточно быстро преодолен усилиями ведущих производителей электромобилей, заинтересованных в росте своих рынков сбыта.

Изменение скорости сложившихся тенденций или даже их направленности возможно в случае резкого изменения политики в отношении

экологического регулирования (например, послабление экологического законодательства, пересмотр методов оценки экологического ущерба и т.д.) или торгово-промышленной политики отдельных стран (например, ведение высоких таможенных пошлин на импорт автомобилей или наложение санкционных ограничений на экспорт новых автомобильных технологий).

Однако более вероятным представляется сценарий, при котором диффузия электромобильных технологий будет, наоборот, стимулироваться различными мерами государственной поддержки, так как это дает возможность решения не только экологических проблем, но и развития новых высокотехнологичных производств в машиностроении [15], электроэнергетике [6], силовой электротехнике и т.д., а также более эффективного энергоменеджмента на региональном уровне [12, 14].

В случае более широкого проникновения электромобильных технологий и, следовательно, более значительного роста спроса на электроэнергию актуальным становится вопрос о сонаправленном развитии электрогенерирующих мощностей и электромобильных технологий, то есть обеспечения покрытия растущего спроса за счет развития «чистых» секторов энергетики, в первую очередь возобновляемой энергетики [13].

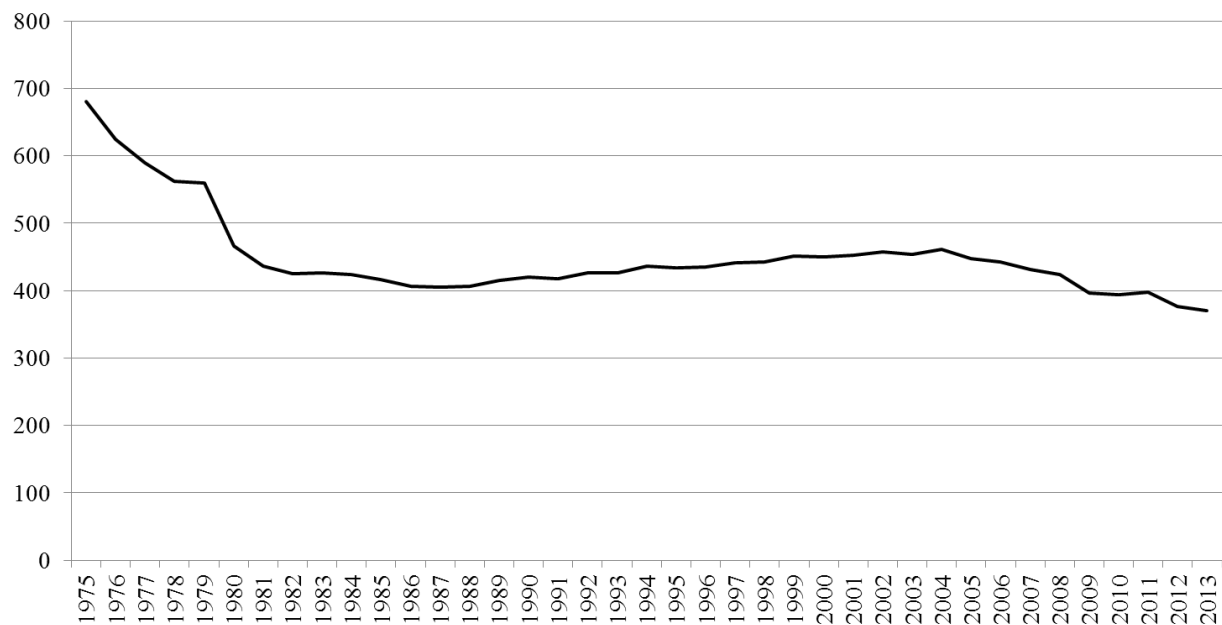
С методической точки зрения это означает необходимость учета в предложенной нами модели как дополнительной тенденции роста энергоэффективности и экологичности процесса генерации электроэнергии. Это направление развития предложенного подхода является предметом наших дальнейших исследований.

Рисунок 1

Динамика выбросов CO₂ автомобилями производства США в граммах на милю пробега в 1975–2013 гг.

Figure 1

Dynamics of CO₂ emission by U.S.-manufactured cars in grams per mile of travel in 1975–2013

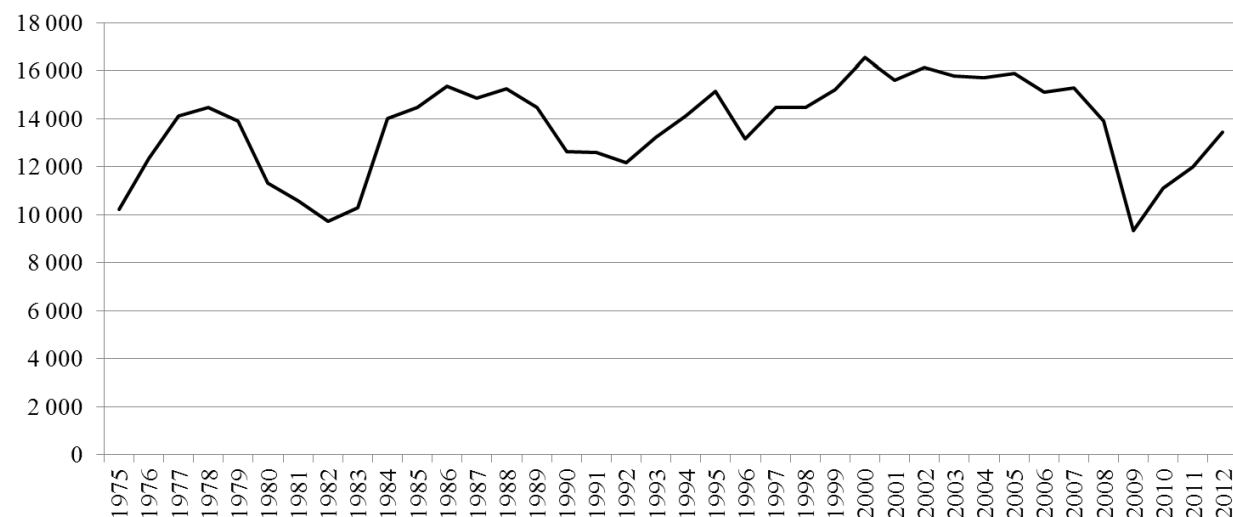


Примечание. Приведены реальные усредненные данные (adjusted), которые отличаются от лабораторных в большую сторону примерно на 25%.

Источник: EPA. Light-Duty Automotive Technology, Carbon Dioxide Emissions, and Fuel Economy Trends: 1975 Through 2013. United States Environmental Protection Agency, 2013

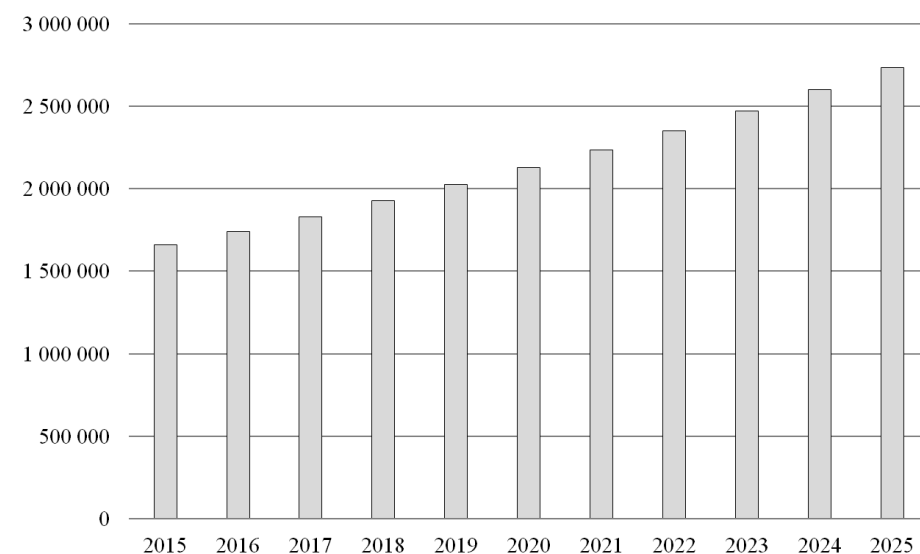
Note. Real averaged data (adjusted), which differ from the laboratory ones by about 25% upward.

Source: EPA. Light-Duty Automotive Technology, Carbon Dioxide Emissions, and Fuel Economy Trends: 1975 Through 2013. United States Environmental Protection Agency, 2013

Рисунок 2**Объемы производства автомобилей в США в 1975–2013 гг., тыс. шт.****Figure 2****Car production volumes in the United States in 1975–2013, thousand cars**

Источник: EPA. Light-Duty Automotive Technology, Carbon Dioxide Emissions, and Fuel Economy Trends: 1975 Through 2013. United States Environmental Protection Agency, 2013

Source: EPA. Light-Duty Automotive Technology, Carbon Dioxide Emissions, and Fuel Economy Trends: 1975 Through 2013. United States Environmental Protection Agency, 2013

Рисунок 3**Прогнозные значения количества автомобилей, находящихся в собственности у населения модельного региона (Краснодарский край) до 2025 г., ед.****Figure 3****Predicted values of the number of vehicles owned by the population of the model region (Krasnodar Krai) until 2025, items**

Источник: авторская разработка

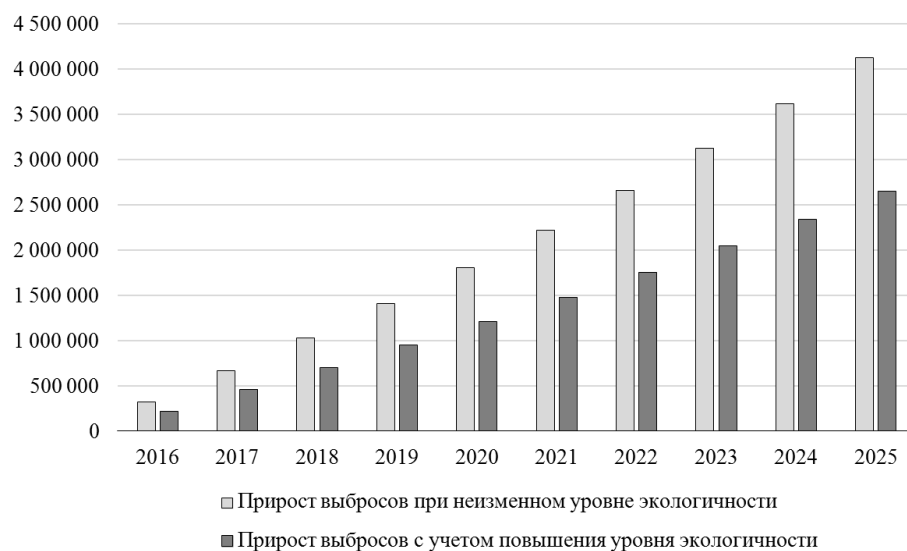
Source: Authoring

Рисунок 4

Прирост выбросов от автомобильного транспорта при прогнозируемом уровне роста автомобилизации населения с учетом и без учета роста уровня экологичности автомобилей до 2025 г., т

Figure 4

Increase in emissions from road transport with projected growth of vehicle-to-population ratio, including and excluding the growth of ecological performance of vehicles up to 2025, tonnes



Источник: авторская разработка

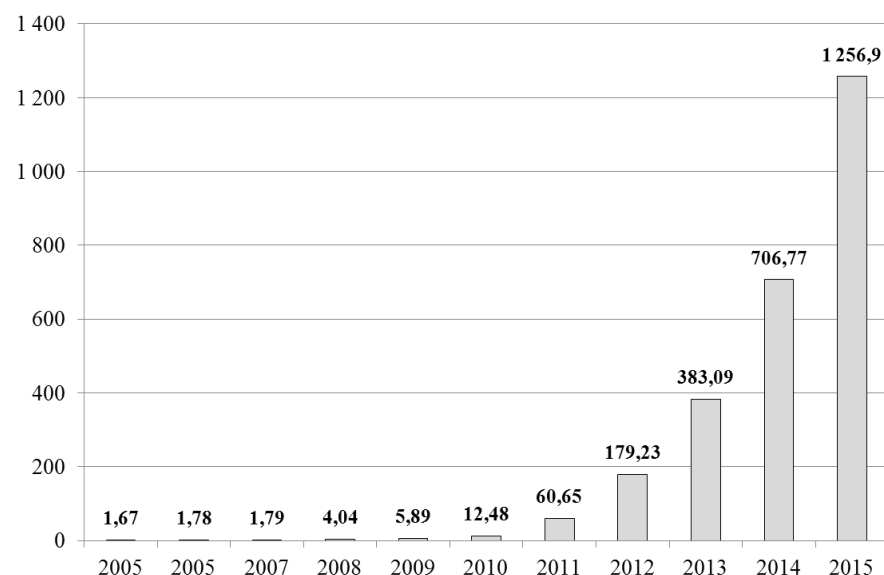
Source: Authoring

Рисунок 5

Количество используемых электромобилей в мире в 2005–2015 гг., тыс. шт.

Figure 5

The number of electric vehicles used in the world in 2005–2015, thousand items



Источник: IEA. Global EV Outlook 2016. Beyond one million electric cars. International Energy Agency, Paris, France, 2016.
URL: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/global_EV_outlook_2016.pdf

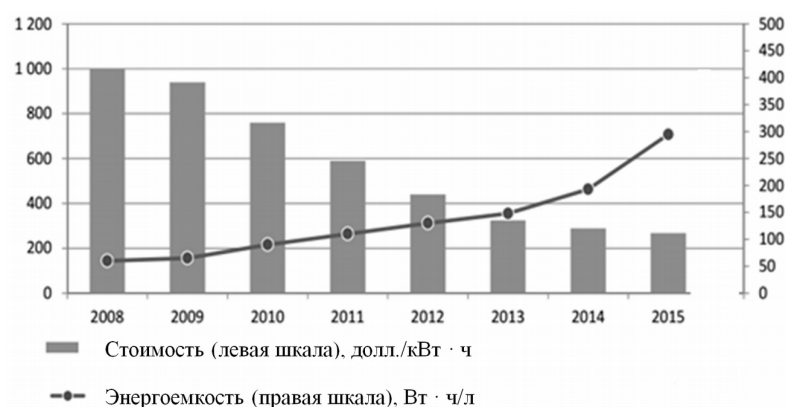
Source: IEA. Global EV Outlook 2016. Beyond one million electric cars. International Energy Agency, Paris, France, 2016. Available at: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/global_EV_outlook_2016.pdf

Рисунок 6

Показатели энергоэффективности (удельная стоимость батареи и ее удельная электроемкость) электромобилей в США в 2008–2015 гг.

Figure 6

Energy efficiency (unit cost of battery and its specific electric capacity) of electric vehicles in the United States in 2008–2015



Источник: IEA. Global EV Outlook 2016. Beyond one million electric cars. International Energy Agency, Paris, France, 2016. URL: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/global_EV_outlook_2016.pdf

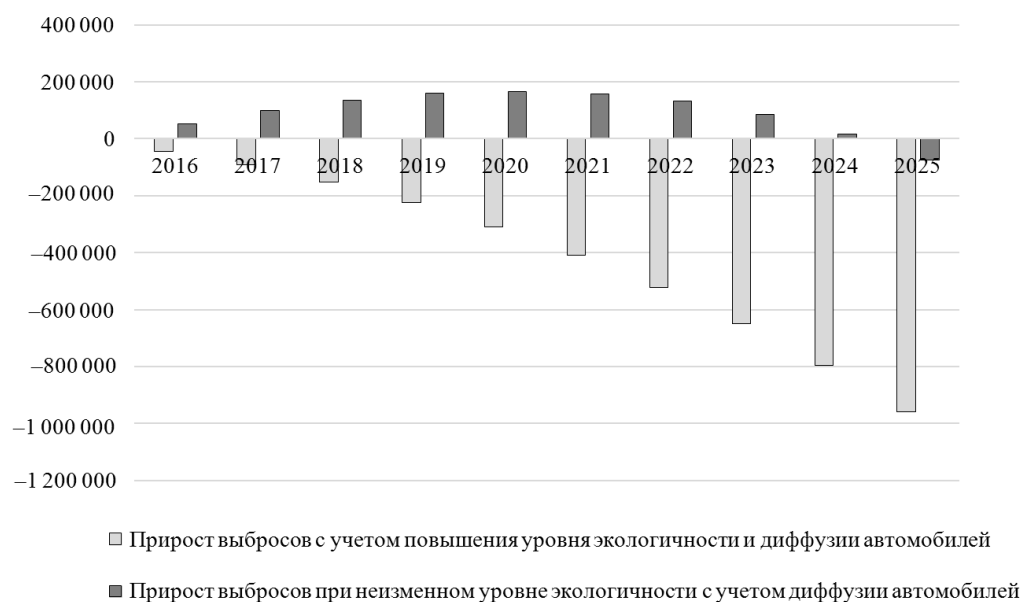
Source: IEA. Global EV Outlook 2016. Beyond one million electric cars. International Energy Agency, Paris, France, 2016. Available at: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/global_EV_outlook_2016.pdf

Рисунок 7

Динамика выбросов от автотранспорта в модельном регионе с учетом диффузии электромобилей до 2025 г., тонн в год

Figure 7

Emissions from vehicles in the model region, taking into account diffusion of electric vehicles until 2025, tonnes per year



Источник: авторская разработка

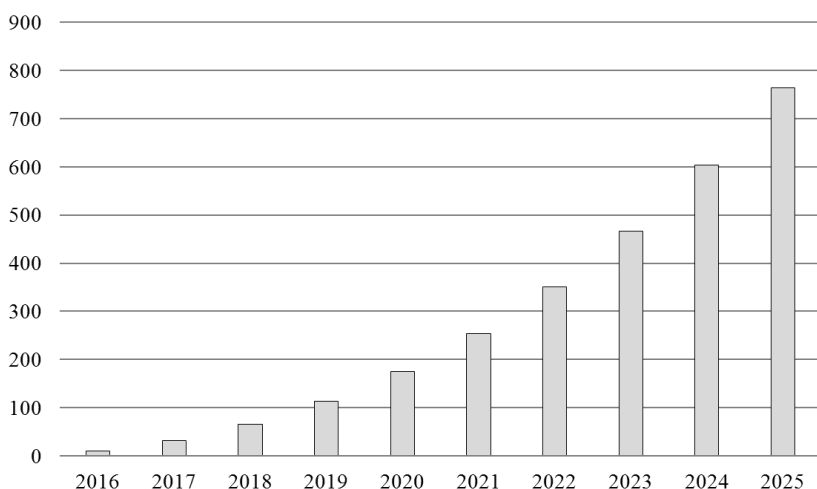
Source: Authoring

Рисунок 8

Рост спроса на электроэнергию до 2025 г. в модельном регионе (Краснодарский край) за счет распространения электромобилей, млн кВт·ч в год

Figure 8

Growth of demand for electricity until 2025 in the model region (Krasnodar Krai) due to electric vehicles expansion, million kWh per year



Источник: авторская разработка

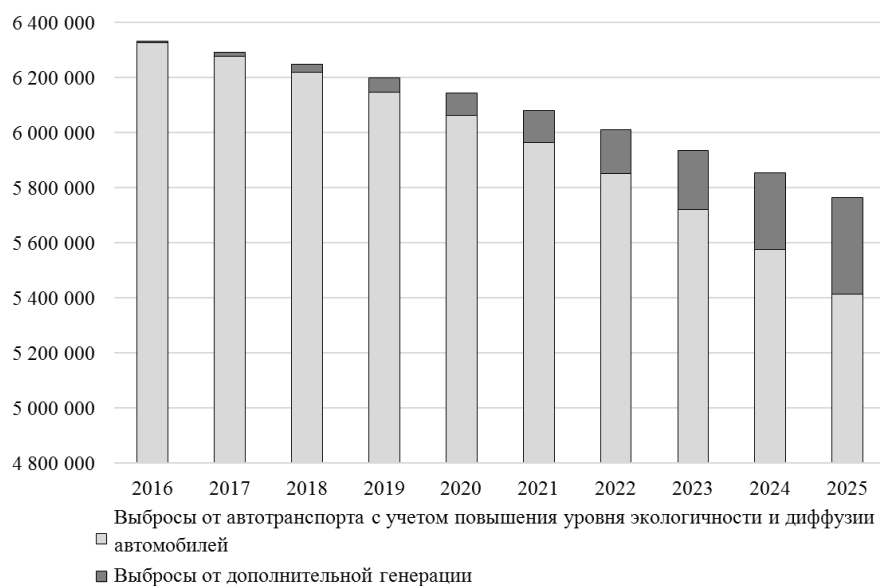
Source: Authoring

Рисунок 9

Прогнозируемая динамика объемов выбросов от автомобильного транспорта с учетом диффузии электромобильных технологий и роста объемов генерации электроэнергии до 2025 г., т

Figure 9

Projected changes in the emission from road transport subject to diffusion of electric vehicle technologies and growth in electricity generation until 2025, tonnes



Источник: авторская разработка

Source: Authoring

Список литературы

1. Битюкова В.Р. Экологическая ответственность Российской промышленности: региональная проекция // *Экология и промышленность России*. 2016. № 4. С. 4–11.
2. Диброва С.С., Иосифов В.В. Проблемы имплементации стандартов моторного топлива // *Материалы международной научно-практической конференции «Управление инновациями – 2015»*. М.: ИПУ РАН, 2015. С. 136–141.
3. Кутлиахметов А.Н. Пристальное внимание к экологическим проблемам // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2012. № 1. С. 10.
4. Петров В.Ю. Легковой транспорт будущего: электромобили, водородные или традиционные автомобили? // *Автомобильная промышленность*. 2009. № 5. С. 7–11.
5. Стил В. Энергетика. Мифы и реальность. Научный подход к анализу мировой энергетической политики. М.: АСТ-Пресс, 2012. 272 с.
6. Тимаков В.В. Электромобиль – предвестник грядущего электрического мира // *Энергетическая политика*. 2016. № 3. С. 86–97.
7. Offer G.J., Howey D., Contestabile M., Clague R., Brandon N.P. Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. *Energy Policy*, 2010, vol. 38, iss. 1, pp. 24–29. doi: 10.1016/j.enpol.2009.08.040
8. Thomas C.E. Fuel cell and battery electric vehicles compared. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, vol. 34, iss. 15, pp. 6005–6020. doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.06.003
9. Turconi R., Boldrin A., Astrup T. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 28, pp. 555–565. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.013
10. Notter D. et al. Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles. *Environmental Science & Technology*, 2010, vol. 44, no. 17, pp. 6550–6556. doi: 10.1021/es903729a
11. Samaras C., Meisterling K. Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug in Hybrid Vehicles: Implications for Policy. *Environmental Science & Technology*, 2008, vol. 42, no. 9, pp. 3170–3176. doi: 10.1021/es702178s
12. Иванов П.П. Станция сверхбыстрой зарядки электромобилей как объект децентрализованной энергетики // *Теплофизика высоких температур*. 2016. Т. 54. № 1. С. 118–123.
13. Шуркалов П.С., Тягунов М.Г. Возможности подзарядки электромобилей от установок на основе возобновляемых источников энергии // *Вестник МЭИ*. 2013. № 5. С. 61–66.
14. Жук А.З., Бузоверов Е.А., Шейндлин А.Е. Распределенные системы накопления электроэнергии на основе парков электромобилей // *Теплоэнергетика*. 2015. № 1. С. 3–8.
15. Ратнер С.В., Ключков В.В. Моделирование развития энергетических компаний в ситуации технологического разрыва. М.: ИПУ РАН, 2015. 234 с.
16. Иосифов В.В., Подворок И.И. Развитие методов экономической оценки экологического ущерба от выбросов автомобильного транспорта // *Дружковский вестник*. 2016. № 1. С. 255–264.
17. Wright T.P. Factors affecting the cost of airplanes. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 1936, vol. 3, no. 4, pp. 122–128.
18. Goulder L.H., Mathai K. Optimal CO2 Abatement in the Presence of Induced Technological Change. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2000, vol. 39, iss. 1, pp. 1–38. doi: 10.1006/jeem.1999.1089

19. *Jamasb T.* Technical change theory and learning curves: Patterns of progress in electricity generation technologies. *Energy Journal*, 2007, vol. 28, no. 3, pp. 51–72. doi: 10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol28-No3-4
20. *MacKenzie D., Heywood J.* Acceleration performance trends and the evolving relationship between power, weight, and acceleration in U.S. light-duty vehicles: A linear regression analysis. *TRB Paper*, 2012, no. 12-1475. Transportation Research Board 91st Annual Meeting, Washington, DC, January 2012.
21. *Диколов Е.А., Ратнер С.В.* Модели качества городской среды // Управление инновациями – 2016: материалы международной научно-практической конференции. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2016. С. 120–130.

Информация о конфликте интересов

Мы, авторы данной статьи, со всей ответственностью заявляем о частичном и полном отсутствии фактического или потенциального конфликта интересов с какой бы то ни было третьей стороной, который может возникнуть вследствие публикации данной статьи. Настоящее заявление относится к проведению научной работы, сбору и обработке данных, написанию и подготовке статьи, принятию решения о публикации рукописи.

FORECASTING THE ENVIRONMENTAL EFFECTS OF DIFFUSION OF ELECTRIC VEHICLE TECHNOLOGIES BASED ON THE LEARNING CURVE METHODOLOGYSvetlana V. RATNER^{a*}, Valerii V. IOSIFOV^b^a V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
lanaratner@ipu.ru^b Kuban State Technological University, Krasnodar, Russian Federation
iosifov_v@mail.ru

* Corresponding author

Article history:Received 21 February 2017
Received in revised form
6 March 2017
Accepted 17 March 2017
Available online
27 April 2017**JEL classification:** O18, O33,
Q42**Keywords:** land transportation,
innovative transportation
technology, electric car, renewable
energy, energy efficiency**Abstract****Importance** Electric vehicles as an alternative to traditional transport facilities with internal combustion engines are deemed to optimize the structure and technological support to transportation systems. However, there is no clear understanding in the scientific community yet as to whether they are better from the environmental effect perspective.**Objectives** The aim of this work is to develop a method of forecasting the environmental effects of diffusion of electric car technologies and test it on the Krasnodar Krai case, taking into account the technical progress in energy efficiency of replaced (traditional transport facilities) and replacing (electric cars) technology.**Methods** We employ the learning theory as a methodological framework, which is widely used to solve the problems of forecasting the technological development.**Results** The calculations show that by 2025 the total volume of private vehicle emission will go down by 9.5% as compared to 2015, if the energy efficiency of vehicles with internal combustion engine and the penetration of electric cars increase. This is true even despite a significant increase in the level of motorization (almost by 65%). Thus, an increasing reach of electric vehicle technologies is preferable from an environmental standpoint.**Conclusions and Relevance** The proposed approach enables to estimate the reduction in emissions from road transport in any region subject to continuing trends in the growth of energy efficiency and environmental friendliness of traditional cars, increase in the vehicle-to-population ratio in Russia, and reduction in electric car cost. The model ignores additional effects of encouraging and discouraging policies.

© Publishing house FINANCE and CREDIT, 2017

Acknowledgments

The article is supported by Russian Foundation for Basic Research, project No. 17-06-00390.

References

1. Bityukova V.R. [Environmental responsibility of Russian industry: A regional aspect]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii = Ecology and Industry of Russia*, 2016, no. 4, pp. 4–11. (In Russ.)
2. Dibrova S.S., Iosifov V.V. [Problems related to implementation of motor fuel standards]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Upravlenie innovatsiyami – 2015"* [Proc. Int. Sci. Conf. Control of Innovation – 2015]. Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of RAS Publ., 2015, pp. 136–141.
3. Kutliakhmetov A.N. [Focused attention to environmental issues]. *Transport na al'ternativnom toplive = Alternative Fuel Transport*, 2012, no. 1, p. 10. (In Russ.)
4. Petrov V.Yu. [Car traffic in the future: Electric, hydrogen or traditional cars?]. *Avtomobil'naya promyshlennost' = Motor Industry*, 2009, no. 5, pp. 7–11. (In Russ.)
5. Smil V. *Energetika. Mify i real'nost'. Nauchnyi podkhod k analizu mirovoi energeticheskoi politiki* [Energy Myths and Realities: Bringing Science to the Energy Policy Debate]. Moscow, AST-Press Publ., 2012, 272 p.
6. Timakov V.V. [Electric vehicles as a harbinger of the future of the electric world]. *Energeticheskaya politika = Energy Policy*, 2016, no. 3, pp. 86–97. (In Russ.)

7. Offer G.J., Howey D., Contestabile M., Clague R., Brandon N.P. Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. *The Energy Policy*, 2010, vol. 38, iss. 1, pp. 24–29. doi: 10.1016/j.enpol.2009.08.040
8. Thomas C.E. Fuel cell and battery electric vehicles compared. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, vol. 34, iss. 15, pp. 6005–6020. doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.06.003
9. Turconi R., Boldrin A., Astrup T. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, vol. 28, pp. 555–565. doi: 10.1016/j.rser.2013.08.013
10. Notter D. et al. Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles. *Environmental Science & Technology*, 2010, vol. 44, no. 17, pp. 6550–6556. doi: 10.1021/es903729a
11. Samaras C., Meisterling K. Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug-in Hybrid Vehicles: Implications for Policy. *Environmental Science & Technology*, 2008, vol. 42, no. 9, pp. 3170–3176. doi: 10.1021/es702178s
12. Ivanov P.P. [Ultra-fast charging station for electric vehicles as an object of decentralized energy]. *Teplofizika vysokikh temperatur = High Temperature*, 2016, vol. 54, no. 1, pp. 118–123. (In Russ.)
13. Shurkalov P.S., Tyagunov M.G. [The possibility of charging electric vehicles from renewable energy plants]. *Vestnik MEI = MPEI Vestnik*, 2013, no. 5, pp. 61–66. (In Russ.)
14. Zhuk A.Z., Buzoverov E.A., Sheindlin A.E. [Distributed energy saving systems based on electric car parks]. *Teploenergetika*, 2015, no. 1, pp. 3–8. (In Russ.)
15. Ratner S.V., Klochkov V.V. *Modelirovanie razvitiya energeticheskikh kompanii v situatsii tekhnologicheskogo razryva* [Simulation of energy companies' development under a technological gap]. Moscow, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences Publ., 2015, 234 p.
16. Iosifov V.V., Podvorok I.I. [Developing the methods of economic evaluation of environmental damage from road transport emissions]. *Drukerovskij Vestnik*, 2016, no. 1, pp. 255–264. (In Russ.)
17. Wright T.P. Factors affecting the cost of airplanes. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 1936, vol. 3, no. 4, pp. 122–128.
18. Goulder L.H., Mathai K. Optimal CO₂ Abatement in the Presence of Induced Technological Change. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2000, vol. 39, iss. 1, pp. 1–38. doi: 10.1006/jeem.1999.1089
19. Jamasb T. Technical change theory and learning curves: Patterns of progress in electricity generation technologies. *The Energy Journal*, 2007, vol. 28, no. 3, pp. 51–72. doi: 10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol28-No3-4
20. MacKenzie D., Heywood J. Acceleration performance trends and the evolving relationship between power, weight, and acceleration in U.S. light-duty vehicles: A linear regression analysis. *TRB Paper*, 2012, no. 12-1475. Transportation Research Board 91st Annual Meeting, Washington, DC, January 2012.
21. Dikolov E.A., Ratner S.V. [Models of urban environment quality] *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Upravlenie innovatsiyami – 2016"* [Proc. Int. Sci. Conf. Control over Innovation – 2016]. Novocherkassk, Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI) Publ., 2016, pp. 120–130.

Conflict-of-interest notification

We, the authors of this article, bindingly and explicitly declare of the partial and total lack of actual or potential conflict of interest with any other third party whatsoever, which may arise as a result of the publication of this article. This statement relates to the study, data collection and interpretation, writing and preparation of the article, and the decision to submit the manuscript for publication.