

Для цитирования: Мазурова О. В. Оценка сравнительной эффективности использования автомобильных топлив и электроэнергии для автомобильного транспорта // Экономика региона. — 2019. — Т. 15, вып. 2. — С. 493-505

doi 10.17059/2019-2-14

УДК 620.9:338

О. В. Мазурова

Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН  
(Иркутск, Российская Федерация; e-mail: ol.mazurova@yandex.ru)

## ОЦЕНКА СРАВНИТЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ТОПЛИВ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА<sup>1</sup>

*Статья посвящена прогнозным исследованиям спроса на автомобильное топливо и электроэнергию для транспорта в условиях роста неопределенности развития и энергоснабжения страны и ее территорий. Актуальность данной работы определяется возрастающими требованиями к экологической чистоте энергоносителей, используемых для автомобильного транспорта. Очевидно, что в будущем автомобили на новых альтернативных видах топлива и энергии будут вытеснять традиционные автомобили на нефтяном топливе. Автором статьи предложен оригинальный методический подход для оценки конкурентоспособности разных видов топлива и энергии для транспорта с учетом региональных условий и характера неопределенности исходных данных. Он позволяет сопоставлять новые конкурирующие технологии энергоснабжения пассажирского и грузового транспорта в разных регионах страны и выбирать наиболее эффективные варианты. Отличительной особенностью разработанной модели энергоснабжения транспорта является сочетание методов оптимизации и имитации на основе техники Монте-Карло с возможностью задания распределения вероятности в диапазоне неопределенности исходных данных. В результате проведенного исследования определены устойчивые тенденции в динамике автомобилизации и структуре энергоносителей в транспортном секторе и оценены возможные последствия внедрения электромобилей в России. Представлены результаты модельных расчетов с различными сочетаниями предполагаемых условий и полученные прогнозные зависимости спроса на автомобильные топлива на легковом и грузовом автотранспорте для отдельных макрорегионов страны. Показано, что экономическая эффективность использования альтернативных видов топлива и энергии для транспорта будет зависеть от региональных особенностей, в частности от динамики изменения цен на энергоресурсы, доли альтернативных энергоносителей на региональном рынке, условий будущего развития региона. Предлагаемый методический подход и полученные результаты могут быть полезными при исследовании проблем развития отраслевых и региональных систем энергетики.*

**Ключевые слова:** конкурентоспособность, спрос, цены, регион, энергетические рынки, выбросы, прогноз, автомобильный транспорт, электротранспорт, электромобиль, альтернативные источники энергии

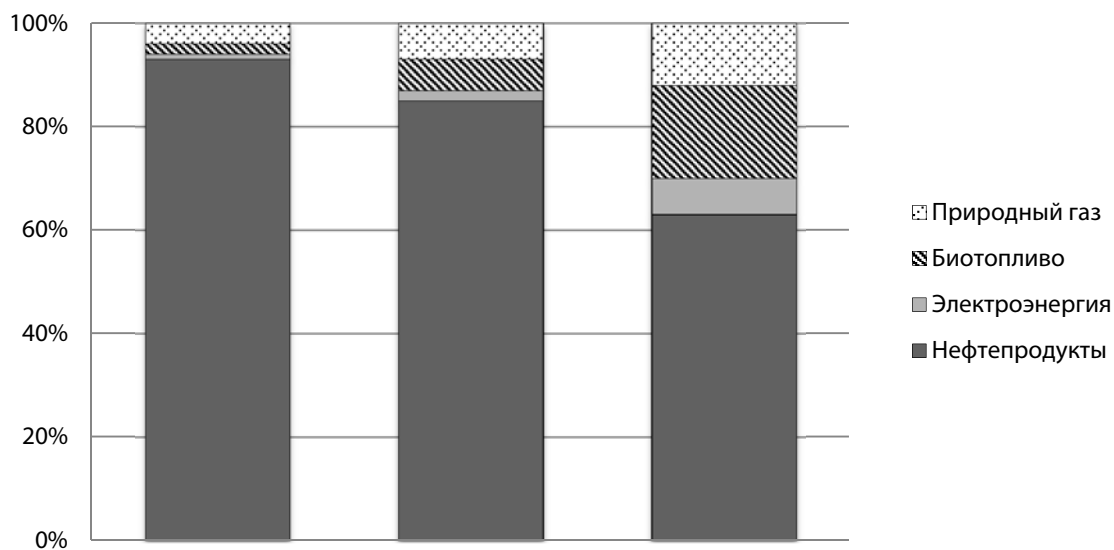
### Введение

Более 70 % нефти и нефтепродуктов в мире потребляется автомобильным транспортом. В соответствии с прогнозами [1, 2], спрос на транспортные услуги будет возрастать. Ожидается, что к 2050 г. количество автомобилей в мире увеличится почти вдвое, в основном за счет развивающихся стран. При этом мировое потребление нефти, которая в основном используется для производства автомобильного топлива (дизельное топливо, бензин), будет увеличиваться [3]. Уже в недалеком будущем существует угроза истощения за-

пасов дешевой нефти и приближения объемов мировой добычи к своему историческому максимуму [4].

Использование автомобильного топлива из нефти является одним из наиболее существенных факторов загрязнения окружающей среды особенно в условиях современного мегаполиса. В крупных городах доля автомобильного транспорта в источниках загрязнения составляет более 80 %. Требование уменьшения выбросов парниковых газов, прежде всего диоксида углерода (CO<sub>2</sub>), является одной из серьезных актуальных проблем. Разрабатываются различные технологии улавливания выбросов CO<sub>2</sub>, а также технологии, способствующие их снижению [5, 6].

<sup>1</sup> © Мазурова О. В. Текст. 2019.



Примечание: прогноз показан для двух сценариев

Рис. 1. Прогноз мировой структуры изменения спроса на энергоресурсы на транспорте, % (сост. автором по [11])

В мире наблюдается тенденция смещения приоритетных направлений в сторону выбора экономических и экологически эффективных видов ресурсов для транспорта (см. например [7]). По оценкам Международного энергетического агентства (МЭА) ожидается процесс диверсификации энергоносителей: нефть окончательно потеряет свое доминирование к 2040 г. Основными заменителями нефтепродуктов в транспортном секторе будут электроэнергия, природный газ и биотопливо (рис. 1).

В данной статье более подробно рассматривается направление электрификации автомобильного транспорта: анализируются динамика текущего развития рынка электромобилей в мире и в России и оценки на долгосрочную перспективу до 2035–2040 гг. Для этого используются новые статистические данные и последние долгосрочные прогнозы развития энергетики, выполненные разными российскими и международными энергетическими организациями. Приводится авторская оценка возможных последствий крупномасштабного внедрения электромобилей в России в долгосрочной перспективе.

#### Развитие электромобилей в мире и в России: современное состояние и прогнозы

Глобальными трендами в развитии транспортной отрасли являются популяризация и массовый запуск в производство электромобилей. Ожидается смена энергетической основы нового поколения легковых автомобилей, работающих на электроэнергии, которая, в свою очередь, потребует качественных трансфор-

маций в энергетике, нефтеперерабатывающей промышленности и экологии [8].

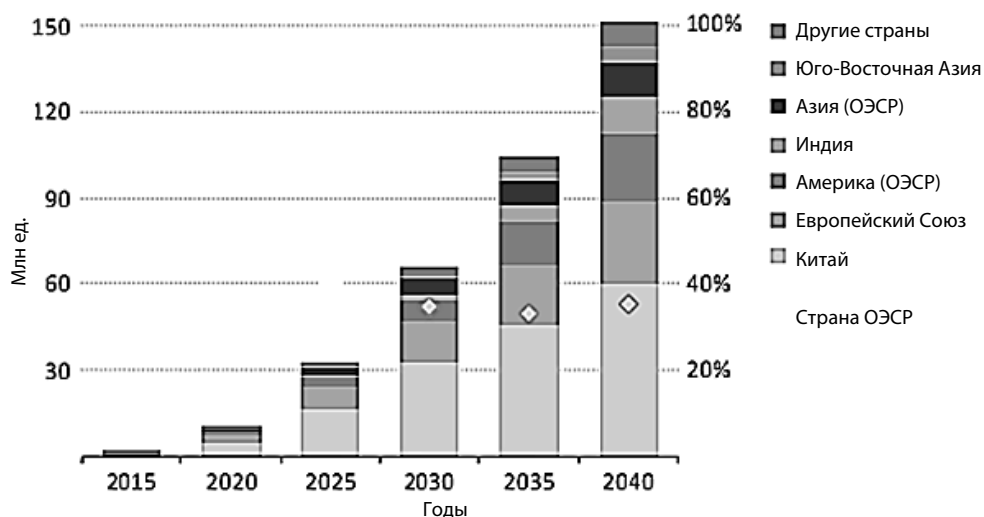
Массовое развитие электромобилей в разных странах мира имеет свои преимущества и последствия (по сравнению с традиционными автомобилями):

- высокая экологичность и сокращение вредных выбросов в атмосферу в регионе эксплуатации;
- снижение зависимости от поставок нефти и нефтепродуктов;
- увеличение спроса на электроэнергию при сокращении спроса на традиционное топливо из нефти;
- снижение шумового загрязнения за счет небольшого количества подвижных частей и механической передачи;
- высокий ресурс работы и надежность электродвигателя и др.

В перспективе транспортные средства на электрической энергии станут не только крупными потребителями электроэнергии, но и в случае их крупномасштабного внедрения (при доле парка 30 % и более) будут использоваться в качестве распределенного накопителя энергии. Эта концепция получила название «vehicle-to-grid» [9, 10].

Число электромобилей в мире увеличивается с каждым годом, а темпы роста этого сегмента составляют 70–80 % в год. К концу 2016 г. общее количество электромобилей в мире достигло 2 млн, а разнообразие моделей возросло с 70 до 130 (с 2013 г.). При этом количество мест для их электрозарядки выросло в 10 раз.

Многие страны принимают меры поддержки, стимулирующие спрос частных поку-



Источник: [11]

Рис. 2. Прогноз динамики роста электромобилей в мире

пателей и коммерческих организаций на электрические автомобили, для того чтобы сократить вредные выбросы транспортного сектора и повысить энергоэффективность стран и городов [12, 13]. Среди них можно выделить монетарные и немонетарные, например, субсидии или налоговые вычеты, предоставляемые при приобретении электромобиля, право проезда по полосам общественного транспорта и по платным автомобильным дорогам и др. [14–16]. Действенность таких мер зависит от множества факторов, отличающихся в разных странах. Например, склонить потребителя к выбору электромобиля могут высокая стоимость бензина или проблемы с парковкой в городе [17].

Лидером по количеству приобретенных электрических автомобилей (150 тыс. ед.) в расчете на 1 тыс. жителей (8,2 ед.) является нефтедобывающая Норвегия. В 2016 г. в стране было продано около 45 тыс. электромобилей. К 2025 г. Норвегия рассчитывает полностью перейти на электрокары, запретив продажу автомобилей, работающих на бензине и дизельном топливе. Общий объем государственных субсидий в поддержку электромобилей оценивается в 5 млрд долл. Росту популярности электрокаров в Норвегии способствует и огромная сеть бесплатных зарядных станций, разбросанных по всей стране — порядка 10 тыс. пунктов. Вместе с тем Норвегия не предлагает покупателю прямой финансовой поддержки в виде субсидии или налогового вычета при приобретении электромобиля. Очевидно, что столь высокий успех мер государственной поддержки, не связанных напрямую с финансовым поощрением приобретения электромобиля, демон-

стрирует для других стран, и в том числе для России, определенный оптимизм в отношении его возможного эффекта.

В 2014 г. самый многочисленный в мире парк США составлял 410 тыс. электромобилей, или около 33 % от общемирового. Однако в 2015 г. китайский рынок захватил первенство по количеству проданных электромобилей и гибридов, опередив рынок США. Количество зарегистрированных в КНР электрокаров превысило 1 млн ед. (рис. 2). Китайское правительство очень серьезно настроено в борьбе с выхлопными газами, смогом и пробками. Поставлена цель довести долю электромобилей до 10 % в продажах новых автомобилей к 2020 г. С точки зрения развивающихся рынков, опыт Китая является наиболее показательным. Он предусматривает прямую финансовую поддержку со стороны государства до 2020 г. Мощным толчком к увеличению парка электромобилей может также послужить обсуждаемая сейчас в Пекине система квот. С 2018 г. правительство Китая собирается обязать всех работающих в стране автопроизводителей выпускать как минимум 8 процентов электромобилей или платить штрафы. Такое решение явно пойдет на пользу отечественным производителям в КНР, которые сосредоточились на принципиально новом направлении — автомобилях с электромоторами.

В соответствии с прогнозом МЭА [11], количество электромобилей будет возрастать примерно на 50 % в год и достигнет к 2020 г. 10 млн ед., а к 2025 г. — 30 млн ед. К 2040 г. мировой парк электромобилей превысит 150 млн ед., а его доля в общемировом автопарке соста-

вит 8 % (рис. 2). В сценарии МЭА (450 Scenario) с более жесткими требованиями экономии топлива и сокращения выбросов выхлопных газов к 2040 г. объем мировых продаж электромобилей достигнет 700 млн ед. В Китае парк электромобилей увеличится почти до 5 млн ед. к 2020 г., а к 2040 г. каждый девятый автомобиль на китайском рынке будет электрическим.

В европейских странах ожидается бурный рост электромобилей уже в 2020 г.: во Франции — до 2 млн ед., Германии — до 1 млн ед. В Нидерландах к 2025 г. доля продаж электромобилей и гибридов возрастет до 50 % общего объема автомобилей, а в Великобритании до 60 % к 2030 г. Правительство Финляндии планирует резко увеличить количество электрозаправочных станций уже в ближайшие годы. Сейчас их всего несколько сотен, но по прогнозу через три года их будет 2 тыс., а к 2030 г. — уже 25 тыс.<sup>1</sup>

Министерство энергетики США прогнозирует опережающий рост электромобилей и гибридов, обусловленный современной стимулирующей государственной политикой и снижением стоимости электрической батареи<sup>2</sup>.

Россия пока отстает от ведущих стран по применению зеленых технологий на автомобильном транспорте. Однако в последние годы в связи с бурной автомобилизацией в городах и регионах нашей страны требования к экологической чистоте энергоносителей, используемых на автотранспорте, становятся все более актуальными. В многочисленных исследованиях [18–20] показано, что основным источником загрязнения окружающей среды является не промышленность, а автотранспорт, на долю которого приходится 70–90 % всех выбросов. По мнению экспертов, в российских условиях наиболее перспективными направлениями на транспорте будут экологичные ресурсы на базе природного газа и электроэнергии [21–25].

Рынок электрических автомобилей в России сейчас находится в стадии формирования. До настоящего времени объемы продаж электромобилей в России были весьма незначительными. Официальные продажи в России первого серийного электромобиля Mitsubishi-MiEV начались в 2011 г. После отмены ввозных пошлин цены на электромобили, продаваемые

в России, несколько снизились, что сделало их вполне конкурентоспособными. По итогам 2016 г. общее количество электромобилей в России составило порядка 920 ед. Из того объема наибольшая доля приходится на Москву и Подмоскowie — более 30 % (367), Приморский край — 15 % (136), Хабаровский край — 8 % (74) и Самарскую область — 6 % (51). Общее по стране количество зарядных станций не превышает 200 ед.<sup>3</sup>

Сдерживающими факторами роста российского рынка электромобилей являются отсутствие государственных субсидий на приобретение автомобиля и других стимулирующих мер, относительно низкая стоимость бензина и дизельного топлива, неразвитость инфраструктуры из-за большой территории и значительной протяженности дорог и т. д. [26]. Развитие электромобилей невозможно без развития инфраструктуры, в которую входят электрозаправочные станции, сервисы обслуживания и ремонта электромобилей, диагностические центры.

В недалеком будущем ситуация в регионах России может существенно измениться в лучшую сторону. Этому способствует государственная «Стратегия развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2025 года»<sup>4</sup>, которая содержит ряд исследовательских и пилотных проектов по развитию зарядной инфраструктуры и производству электромобилей. Ключевой целью этого проекта является создание условий и возможных мер по поддержке спроса на электромобили для широкомасштабного внедрения всех видов электротранспорта на территории страны. Меры поддержки предусматривают введение льготных тарифов на платных дорогах, бесплатные парковки в городах, возможность двигаться по выделенным полосам для общественного транспорта, нулевой транспортный налог и упрощение бюрократических процедур для строительства зарядных станций и т. п.

Массовое развитие электромобилей в России может привести к качественным трансформациям в энергетическом комплексе и

<sup>1</sup> «Зеленый» автомобиль. Почему весь мир переходит на электротранспорт // ТАСС [Электронный ресурс]. URL: <http://tass.ru/obschestvo/4044852> (дата обращения: 13.12.2017).

<sup>2</sup> Annual Energy Outlook 2017 with Projections to 2050. — US Energy Information Administration, Washington, September 2017 [Электронный ресурс] URL: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/> (дата обращения: 9.11.2017).

<sup>3</sup> В России насчитывается 920 электромобилей // Автостат. Аналитического агентства [Электронный ресурс]. URL: <https://www.autostat.ru/news/29517/> (дата обращения: 15.01.2018).

<sup>4</sup> Стратегия развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2025 года (проект) [Электронный ресурс]. URL: <http://economy.gov.ru/mines/about/structure/depSectorEconom/2017310512> (дата обращения: 12.09.2017).



Таблица 1

**Оценка дополнительного спроса на электроэнергию и сокращения выбросов парниковых газов при внедрении электромобилей в Российской Федерации в долгосрочной перспективе**

Показатель	Значение показателя по годам		
	2025	2030	2035
Прогноз электропотребления, млрд кВт·ч*	1220	1285	1340
Обеспеченность автомобилями на 1 тыс. чел. населения, ед.	380	405	450
Доля электромобилей, %	3	17	20
Общая численность автопарка, млн ед.	56	60	65
Парк электромобилей, млн ед.	1	10	13
Сокращение выбросов CO <sub>2</sub> , млн т в год	2	13	17
Прирост электропотребления, тыс. ТВт·ч	4	27	36

Примечания:

\* прогноз «Энергетическая стратегия России на период до 2035 г.» (проект) (Энергетическая стратегия России на период до 2035. Основные положения // Министерство энергетики РФ [Электронный ресурс]. URL: [http://www.energystrategy.ru/projects/docs/OP\\_ES-2035.doc](http://www.energystrategy.ru/projects/docs/OP_ES-2035.doc) (дата обращения: 25.05.2017.)

Источник: оценка автора.

экологии [27, 28]. Ниже представлена полученная автором прогнозная оценка возможных последствий крупномасштабного внедрения электромобилей в России. Экологический эффект и оценка возможного снижения выбросов парниковых газов CO<sub>2</sub> определялись на основе прогноза выбросов и динамики удельных расходов топлива (газа и угля) на производство электроэнергии. Численность автопарка была рассчитана в соответствии с условиями прогноза: обеспеченностью населения автомобилями в расчете на 1000 чел. и заданной долей перехода на электромобили в общем парке легковых автомобилей в России (17 и 20 %), принятой из Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2025 года.

На основе проведенной оценки, результаты которой представлены в таблице 1, можно предположить, что в 2030–2035 гг. при росте численности электромобилей в размере 10–13 млн ед. объем CO<sub>2</sub> может снизиться на 13–17 млн т в год. Дополнительный прирост спроса на электроэнергию составит 27–36 ТВт·ч (с учетом зарядки батареи). Из чего можно сделать вывод, что из энергосистемы России в 2030–2035 гг. будет потреблено дополнительно около 2,2–2,7 % электроэнергии от суммарного конечного электропотребления. Очевидно, что такой прирост электропотребления не представляет серьезной проблемы для электроэнергетики страны в долгосрочной перспективе.

Результаты расчетов показывают возможность сокращения объемов парниковых газов и уменьшения их влияния на жителей регионов. Замена традиционного автомобиля с ДВС (двигателем внутреннего сгорания) на электромобиль приводит в конечном итоге к сокращению выбросов парниковых газов в среднем на 0,7–1 % от общего снижения выбросов CO<sub>2</sub> в нашей стране. При этом суммарный экологический эффект от массового использования электромобилей будет намного выше.

Методический подход

В последние годы активно развиваются подходы к оценке сравнительной эффективности новых технологий на автотранспорте благодаря возрастающему интересу к проблеме защиты окружающей среды [4, 17, 22]. Очевидно, что при выборе энергоресурса необходимо учитывать различные экономические показатели и критерии, характеризующие эффективность спроса на топливо и энергию, среди них можно выделить:

- наличие региональных ресурсов с имеющейся инфраструктурой для их хранения;
- соотношение цен между альтернативными и традиционными энергоресурсами;
- затраты на адаптацию техники и развитие инфраструктуры (заправочные станции, сервисы обслуживания и ремонта электромобилей, диагностические центры).

Для прогнозных исследований на легковом и грузовом автотранспорте разработана модель энергоснабжения транспортного сектора [29]. Новизной предлагаемого методического подхода является сочетание метода оптимизации с имитационным подходом, использующим метод статических испытаний (техника Монте-Карло) с возможностью задания распределения вероятности в диапазоне неопределенности исходных данных. Использование данного подхода позволяет формировать множество вариантов оптими-

зации для учета неоднозначности будущих условий развития и энергоснабжения рассматриваемого региона.

С помощью модели решается задача оценки конкурентоспособности разных видов автомобильных топлив в рассматриваемой перспективе в зависимости от динамики изменения цен на энергоресурсы, используемых новых и существующих технологий, доли альтернативных энергоносителей на региональном рынке, условий будущего развития региона и других факторов.

Основными искомыми переменными в модели энергоснабжения транспорта являются объемы перевозок, учитывающие разные технологии, размер и структура автопарка, использующего традиционные и альтернативные энергоносители, динамика спроса на топливо и энергию в регионе. Критерием экономической эффективности в модели является минимальная стоимость перевозки:

$$F = \sum_i \sum_e R_{eij} X_{eij} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $X_{eij}$  — объем перевозок  $i$  с использованием энергоносителя (топлива)  $e$ , по технологии  $j$  (искомая переменная);  $R_{eij}$  — цена услуги  $i$ , произведенной на энергоносителе (топливе)  $e$ , руб./ед. перевозки по технологии  $j$  определяется по формуле:

$$R_{eij} = \sigma_1 (c_{ei} b_{eij} + u_{eij}) + \sigma_2 \sigma k_{ei} / h_{eij}, \quad (2)$$

где  $c_{ei}$  — цена энергоносителя (топлива)  $e$ , руб./т у. т.;  $b_{eij}$  — удельный расход топлива  $e$  на  $i$  по технологии  $j$ , т у.т./ед. перевозки;  $k_{eij}$  — удельные капиталовложения на прирост мощности транспортной работы  $i$  на топливе  $e$  по технологии  $j$ , руб./ед. перевозки;  $u_{eij}$  — условно-постоянная часть себестоимости транспортной работы  $i$  (без топливной составляющей), производимой с использованием топлива  $e$  по технологии  $j$ , руб./ед. перевозки;  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma$  — коэффициенты дисконтирования, эффективности капиталовложений и корректировки себестоимости.

Все необходимые для расчетов исходные данные и их ограничения задаются в виде интервалов их возможных значений (от минимального до максимального) с разной степенью вероятности внутри этих интервалов. Экспертно оценивается характер распределения вероятности исходных данных для учета неопределенности будущих условий: нормальное распределение, равномерное, логнормальное и т. д. Заданная потребность в перевозках должна быть удовлетворена наиболее эффективным способом на основе конкуренции

разных видов топлива и энергии и возможных технологий.

В соответствии с разработанными вариантами энергоснабжения региона для каждого из них проводится серия из нескольких сотен модельных экспериментов с разной комбинацией исходных данных, имитирующих поведение потребителя (в данном случае автомобильного транспорта). Из множества полученных решений отбираются наиболее устойчивые к изменению условий спроса, цен, технологий и т. п.

Спрос на автомобильное топливо в регионе определяется динамикой изменения цен на энергоресурсы (дизельное топливо —  $C_p^d$ , бензин —  $C_p^b$ , природный газ —  $C_i^r$  и т. д., параметрами изменения технологий автомобильного транспорта ( $P_i$ ), ограничениями на поставки этих топлив в регион  $i$  ( $T_i$ ) и др.:

$$B_i = f(C_p^b, C_p^d, C_i^r, T_i, P_i, \dots). \quad (3)$$

Поэтапный процесс имитационного исследования представлен на рисунке 3. Ниже приводятся результаты экспериментальных расчетов конкурентоспособности электроэнергии на легковом автомобильном транспорте и альтернативных видов топлива на основе природного газа на грузовом автотранспорте, полученных с помощью описанной выше модели энергоснабжения транспорта. При этом учитывались региональные особенности и характер неопределенности исходных данных.

### Результаты проведенного исследования

*Легковой автомобильный транспорт.* В данном исследовании рассматривался вариант замещения на автомобилях с ДВС жидкого углеводородного топлива электроэнергией. Рассматривались такие крупные макрорегионы страны, как европейская часть РФ, Сибирь и Дальний Восток, отличающиеся, прежде всего, климатическими и географическими условиями, а также динамикой цен на топливо и электроэнергию. При этом учитывались их региональные особенности, сравнительная эффективность использования традиционных моторных топлив (бензин, дизельное топливо) и электроэнергии, а также возрастающая неопределенность исходных данных.

В качестве исходных данных, необходимых для проведения расчетов на модели энергоснабжения транспорта, выбраны следующие показатели: динамика изменения цен на топливо и электроэнергию, удельные капиталовложения, параметры изменения технологий автомобильного транспорта, удельные расходы то-

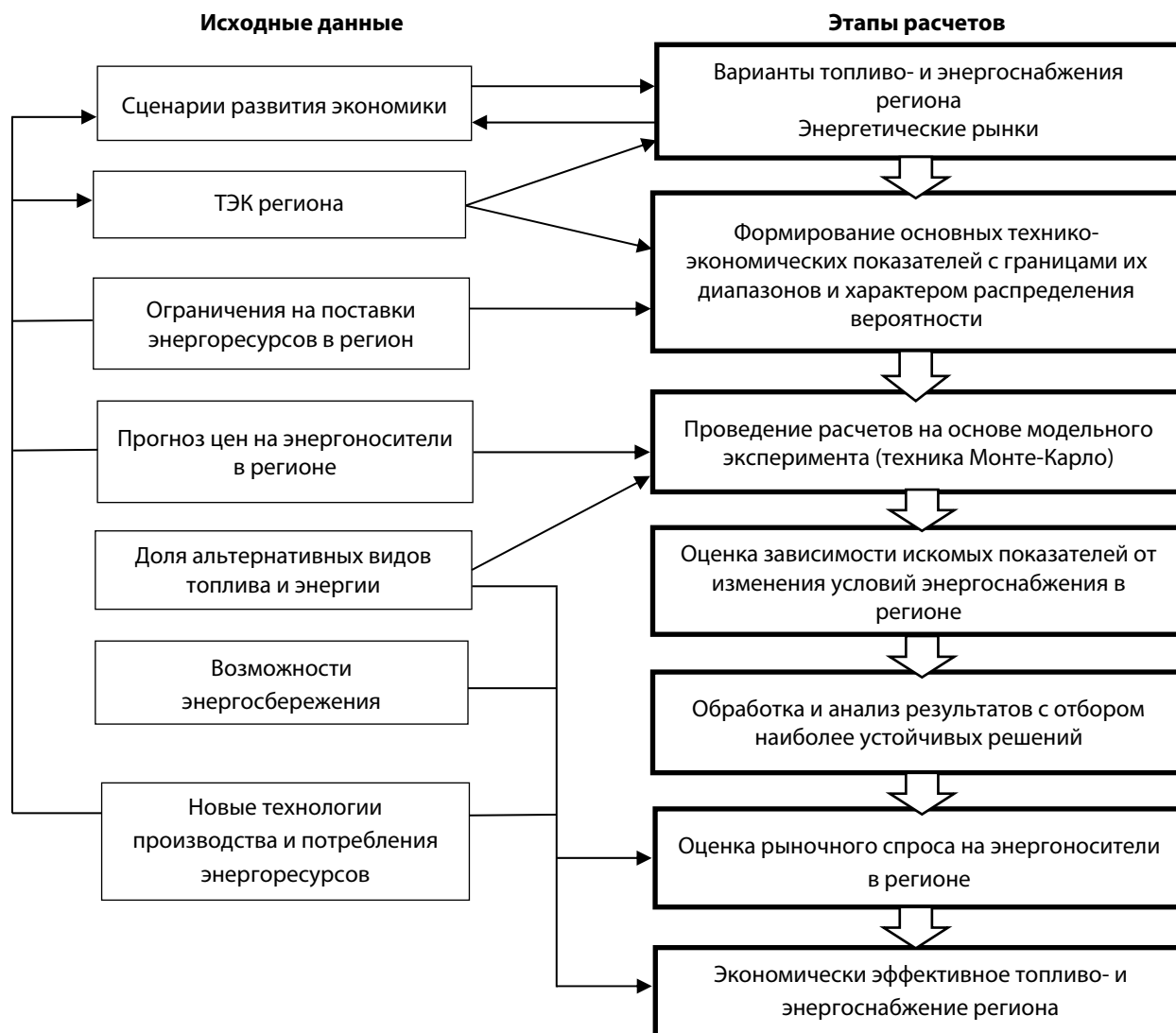


Рис. 3. Общая схема имитационного исследования

плива и электроэнергии, условия энергоснабжения региона и др. Интервальные значения требуемых показателей принимались на основе перспективных оценок вариантов развития и энергоснабжения рассматриваемых макрорегионов, а возможные диапазоны цен на конкурирующие виды топлива и энергии — из прогнозов цен, представленных в таблице 2. Рассматривались два варианта распределения вероятных значений показателей внутри задаваемых диапазонов: равновероятное (ин-

тервальная неопределенность) и нормальное (близкое к среднему).

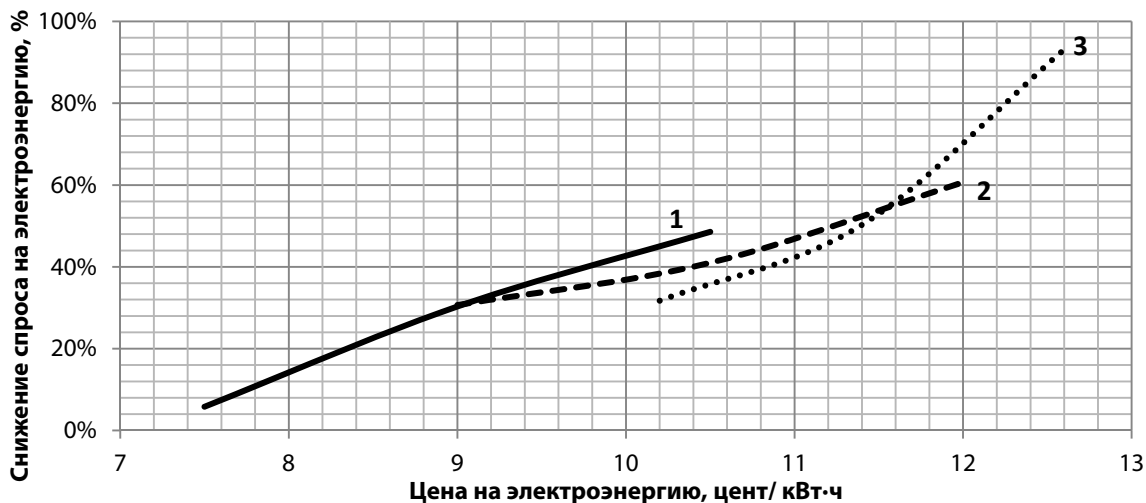
Расчеты на модели показывают, что в случае перевода легкового автотранспорта на электроэнергию различия в ценах и другие региональные особенности, принятые для прогнозных условий 2020–2030 гг., обусловили изменение спроса на электроэнергию, различающееся по территориям (рис. 4). Показано, что при замещении углеводородного топлива электроэнергией сильнее всего реагирует на

Таблица 2

Прогноз цен на топливо и электроэнергию по макрорегионам России, 2020–2030 гг.

Показатель	Ед-ца измерения	Цена по регионам		
		европейская часть РФ	Сибирь	Дальний Восток
Высококачественный бензин*	долл/т	950–1210	950–1210	1200–1475
Дизельное топливо*	долл/т	830–1060	830–1060	830–1290
Электроэнергия	ц/кВт·ч	7,5–12,0	6,0–10,5	9,0–12,5

\* цены традиционных видов моторного топлива рассчитаны с учетом затрат на доставку до потребителя. Источник: рассчитано по [4, 30] с учетом регионального коэффициента.



1 — европейская часть страны, 2 — Сибирь, 3 — Дальний Восток

**Рис. 4.** Зависимость спроса на электроэнергию для автомобильного транспорта от ее цены в крупных макрорегионах России (нормальное распределение исходных данных)

заданные условия Дальний Восток, где проявляется самая высокая неопределенность энергоснабжения.

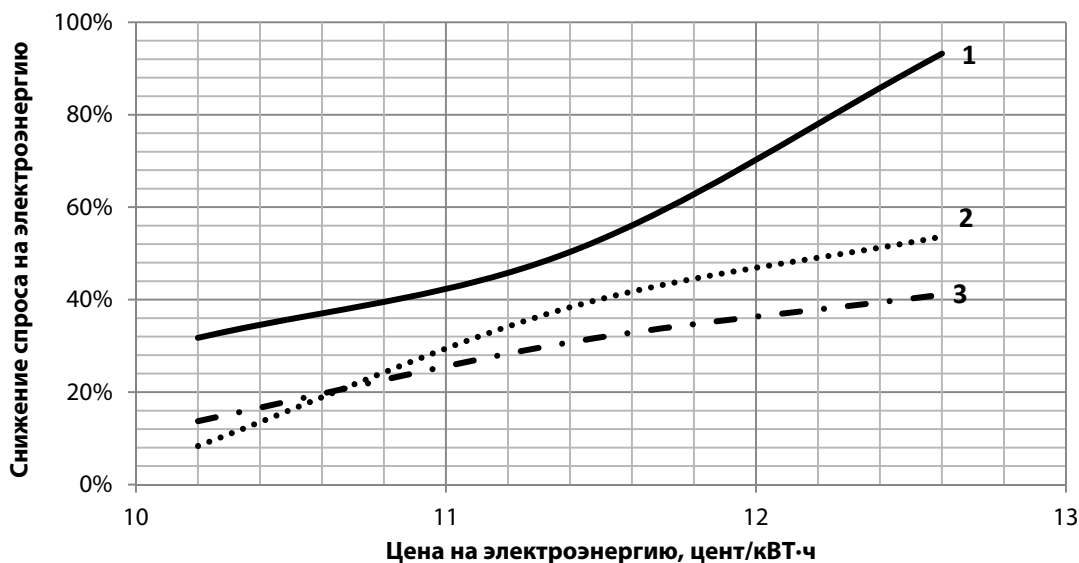
На рисунке 5 проиллюстрирована реакция изменения спроса на электроэнергию с учетом влияния характера неопределенности исходных данных. Показано, что с ростом цены на электроэнергию (в исходном диапазоне значений) спрос на нее на Дальнем Востоке снижается на 8–54 % при интервальной неопределенности (высокие цены) и на 32–93 % при нормальном распределении данных. Снижение спроса на электроэнергию свидетельствует, прежде всего, об уменьшении конкурентоспособности электроэнергии в ожидаемых усло-

виях, а также об изменении структуры энергоснабжения на автотранспорте в сторону увеличения спроса на нефтяные топлива (бензин и дизельное топливо).

**Грузовой автотранспорт.** Для сравнения конкурентоспособности автомобильных топлив на грузовом автотранспорте рассматривались два основных варианта замещения жидкого углеводородного топлива новыми альтернативными топливами из природного газа (с высокими и низкими ценами):

бензин — дизельное топливо — синтетическое жидкое топливо (СЖТ);

бензин — дизельное топливо — природный газ (метан).



1 — нормальное распределение исходных данных, 2 — интервальная неопределенность (низкие цены на электроэнергию), 3 — интервальная неопределенность (высокие цены на электроэнергию)

**Рис. 5.** Влияние характера неопределенности исходных данных на снижение спроса на электроэнергию на легковом автотранспорте в ожидаемых условиях (для Дальнего Востока страны)



Таблица 3

**Оценка спроса на моторное топливо на грузовом автотранспорте Дальнего Востока РФ,  
для условий 2020–2025 гг. (вариант 1)**

Показатель	Равномерное распределение (интервальная неопределенность) по ценам		Нормальное распределение по ценам	
	низкие	высокие	низкие	высокие
<i>Цены на топливо, долл/т</i>				
Дизельное топливо	1120–1340	1950–2270	1230	2100
Бензин	1400–1540	1960–2150	1460	2060
СЖТ из природного газа	1300–1410	1730–1900	1475	1810
<i>Потребность в топливе, тыс. т</i>				
Дизельное топливо	970–1170	1200–1390	1070	1250
Бензин	540–610	550–630	580	590
СЖТ из природного газа	725–880	530–610	780	580
<i>Стоимость перевозки грузов, долл/т/км</i>				
Дизельное топливо	0,14–0,19	0,15–0,20	0,16	0,18
Бензин	0,20–0,25	0,21–0,26	0,22	0,24
СЖТ из природного газа	0,16–0,21	0,20–0,26	0,18	0,23

Источник: расчеты автора.

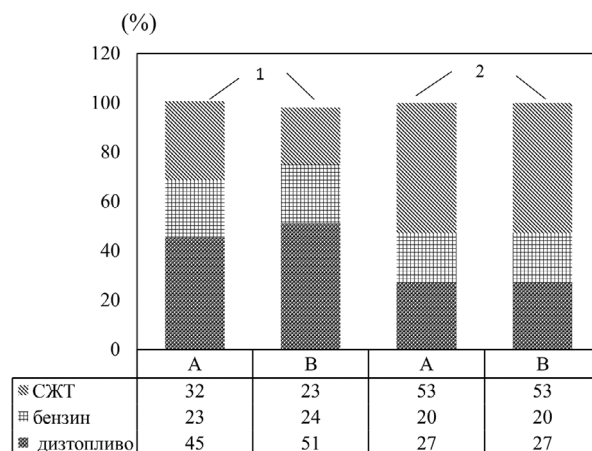
Ограничения на поставки топлива в этих расчетах не накладывались.

В таблице 3 приведены результаты расчетов, полученные для варианта 1 при конкуренции СЖТ с топливами из нефти для ожидаемых условий топливоснабжения грузового автотранспорта дальневосточного региона страны.

В качестве примера был выбран Дальний Восток, где неопределенность условий энергоснабжения одна из самых высоких в стране. Исходные данные приняты на основе прогнозных оценок за период 2020–2025 гг.<sup>1</sup> Согласно прогнозу, к 2020–2025 гг. грузооборот на Дальнем Востоке, обусловленный ускоренным развитием восточных регионов<sup>2</sup> и реализацией новых инвестиционных проектов, вырастет более чем в 2–2,5 раза по сравнению с 2013 г., объем перевозимых грузов — в 1,5 раза,

<sup>1</sup> Программа создания в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке единой системы добычи, транспортировки газа и газоснабжения с учетом возможного экспорта газа на рынки Китая и других стран АТР [Восточная газовая программа. Утв. в 2007 г.] // Министерство промышленности и энергетики РФ. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gazprom.ru/about/production/projects/east-program> (дата обращения: 25.12.2017); Энергетическая стратегия России на период до 2035 г. Проект // Министерство энергетики РФ [Электронный ресурс]. URL: <http://minenergo.gov.ru/upload/iblock/665/665a6512e64ffd5e3d30d9448d7b7fff.pdf> (дата обращения: 25.06.2017)

<sup>2</sup> Стратегия социально-экономического развития Дальнего Востока и Байкальского региона на период до 2025 года / Утверждена Правительством РФ. 2009 г. № 2094-р. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.city-strategy.ru/UserFiles/Files/Strategy%20DVFO\\_2025.pdf](http://www.city-strategy.ru/UserFiles/Files/Strategy%20DVFO_2025.pdf) (дата обращения: 20.11.2017)



**Рис. 6.** Изменение структуры спроса на моторное топливо для ожидаемых условий развития Дальнего Востока по вариантам: 1) бензин — дизельное топливо — синтетическое моторное топливо, 2) бензин — дизельное топливо — газ; А — при низких ценах, В — при высоких ценах (источник: расчеты автора)

а средняя дальность перевозок — почти в 1,7 раза.

Анализ данных показывает, что при сравнении нижнего диапазона цен на топливо возрастает эффективный спрос на СЖТ и снижается спрос на традиционные топлива. При этом, как показано на рисунке 6, в первом варианте меняется структура спроса на топливо: возрастает доля нефтяных топлив с 68 % до 75 % при снижении доли СЖТ с 32 % до 23 %. Однако во втором варианте структура спроса останется неизменной за счет существенной разницы в цене на природный газ по сравнению с нефтяным топливом.

### Заключение

Очевидно, что в будущем автомобили на новых альтернативных видах топлива и энергии будут вытеснять традиционные автомобили на ДВС. Массовое развитие электромобилей в России будет иметь свои преимущества и последствия. Перевод автомобильного парка России на электрическую тягу вызовет повышение спроса на электроэнергию и, соответственно, его снижение на моторное топливо. Полученные прогнозные оценки показывают, что быстрое развитие электромобилей в долгосрочной перспективе и рост их доли в общем автопарке страны не представляют серьезной проблемы для сектора производства электроэнергии нашей страны. Они также демон-

стрируют возможность существенного снижения объемов парниковых газов и уменьшения их влияния на жителей регионов. При этом общий экологический эффект будет зависеть от технических характеристик электромобилей, климатических условий их эксплуатации и от структуры производства электроэнергии.

Как показали результаты модельного эксперимента, экономическая эффективность использования новых энергоресурсов для транспорта будет зависеть от региональных особенностей, в частности, от динамики изменения цен на энергоресурсы, доли альтернативных энергоносителей на региональном рынке, условий будущего развития региона.

### Благодарность

*Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, РФФИ (проекты № 17-06-00102-а, 18-010-00176-а).*

### Список источников

1. Transport Outlook 2050: Seamless Transport for Greener Growth. — Paris: OECD/ITF, 2012. — 60 p.
2. Global Transport Scenarios 2050. World Energy Council Regency House. — London, 2011. — 76 p.
3. Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года / под ред. А. А. Макарова. — М.: ИНЭИ РАН, АЦПР, 2013. — 110 с.
4. Синяк Ю. В., Колпаков А. Ю. Эффективность производства синтетических моторных топлив из природного газа // Проблемы прогнозирования. — 2012. — № 1. — С. 38–48.
5. Sustainable DME synthesis-design with CO<sub>2</sub> utilization / Prasertsria W., Frauzemb R., Suriyaphradilok U., Ganib R. // Computer Aided Chemical Engineering. — 2016. — Vol. 38. — Pp. 1081–1086. — DOI: 10.1016/B978-0-444-63428-3.50185-5.
6. Hinze J. F., Nellis G. F., Anderson M. H. Cost comparison of printed circuit heat exchanger to low cost periodic flow regenerator for use as recuperator in a s-CO<sub>2</sub> Brayton cycle // Applied Energy. — 2017. — Vol. 208. — Pp. 1150–1161. — DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.037.
7. Lao J. M., Montoya F. G., Montoya M. G. Electric vehicles in Spain: An overview of charging systems // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2017. — Vol. 77. — Pp. 970–983.
8. Тиматков В. В. Электротранспорт как часть электрического мира. Факты и прогнозы / под ред. В. В. Бушуева. — М.: ИД «Энергия», 2015. — 48 с.
9. Parsonsa G. R., Hidrueb M. K., Kemptona W., Gardnerc M. P. Willingness to pay for vehicle-to-grid (V2G) electric vehicles and their contract terms // Energy Economics. — 2014. — Vol. 42. — Pp. 313–324. — DOI: 10.1016/j.eneco.2013.12.018.
10. Udrene L., Bazbauers G. Role of vehicle-to-grid systems for electric load shifting and integration of intermittent sources in Latvian power system // Energy Procedia. — 2015. — Vol. 72. — Pp. 156–162. — DOI: 10.1016/j.egypro.2015.06.022.
11. World Energy Outlook / International Energy Agency. — Paris: OECD/IEA, 2016. — 684 p.
12. Bubeck S., Tomaschek J., Fahl U. Perspectives of electric mobility: Total cost of ownership of electric vehicles in Germany // Transport Policy. — 2016. — Vol. 50. — Pp. 63–77. — DOI: 10.1016/j.tranpol.2016.05.012.
13. Figenbaum E. Perspectives on Norway's supercharged electric vehicle policy Environmental Innovation and Societal Transitions // Environmental Innovation and Societal Transitions. — 2017. — Vol. 25. — Pp. 14–34.
14. Zhan X., Liang Y., Yu E., Rao R., Xie J. Review of electric vehicle policies in China: Content summary and effect analysis // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2017. — Vol. 70. — Pp. 698–714. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.250.
15. Wesseling J. H. Explaining variance in national electric vehicle policies // Environmental Innovation and Societal Transitions. — 2016. — Vol. 21. — Pp. 28–38. — DOI: 10.1016/j.eist.2016.03.001.
16. Yong T., Park C. A qualitative comparative analysis on factors affecting the deployment of electric vehicles // Energy Procedia. — 2017. — Vol. 128. — Pp. 497–503.
17. Zhang Y., Yu Y., Zou B. Analyzing public awareness and acceptance of alternative fuel vehicles in China: The case of EV // Energy Policy. — 2011. — Vol. 39(11). — Pp. 7015–7024. — DOI: 10.1016/j.rai.2016.01.001.
18. Эколого-экономический анализ использования различных видов топлива на объектах нефтегазового комплекса / С. В. Коняев, К. В. Романов, Г. С. Аكوпова и др. — М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2012. — 129 с.

19. Данилов А. М., Каминский Э. Ф., Хавкин В. А. Альтернативные топлива. Достоинства и недостатки. Проблемы применения // Российский химический журнал. — 2003. — Т. XLVII. — № 6. — С. 4–11.
20. Шеховцев А. А., Чижов С. Г. Воздействие предприятий топливно-энергетического комплекса на окружающую среду // Энергетическая политика. — 2009. — № 1. — С. 32–42.
21. Брагинский О. Б. Альтернативные моторные топлива. Мировые тенденции и выбор для России // Российский химический журнал. — 2008. — № 6. — Т. LII. — С. 137–146.
22. Синяк Ю. В., Колтаков А. Ю. Экономические оценки использования в автотранспорте альтернативных моторных топлив на базе природного газа // Проблемы прогнозирования. — 2012. — № 2. — С. 34–46.
23. Стасайтис А. В. Перспективы развития рынка АГЗС в России // Транспорт на альтернативном топливе. — 2008. — № 1. — С. 22–28.
24. Пронин Е. Н. Природный газ — моторное топливо XXI века // Транспорт Российской Федерации. — 2007. — № 10. — С. 12–14.
25. Волков В. С., Каплун С. В., Зеря А. В. Новое оборудование для использования метана в качестве моторного топлива // Транспорт на альтернативном топливе. — 2008. — № 1. — С. 40–43.
26. Цыпулев Д. Ю. Влияние развития электротранспорта на ее энергетические системы // Энергетическая политика. — 2012. — № 1. — С. 58–64.
27. Инновационная электроэнергетика — 21 / ред. Батенина В. М., Бушуева В. В., Воропая Н. И. — М.: ИЦ «Энергия», 2017. — 584 с.
28. Бушув В. В., Афанасьева М. В. Энергетика нового поколения // Энергетическая политика. — 2013. — № 6. — С. 16–21.
29. Методы и модели прогнозных исследований взаимосвязей энергетики и экономики / Ю. Д. Кононов, Е. В. Гальперова, О. В. Мазурова и др. — Новосибирск: Наука, 2009. — 178 с.
30. Обоснование развития электроэнергетических систем. Методология, модели, методы, их использование / Н. И. Воропая, С. В. Подковальников, В. В. Труфанов и др. — Новосибирск: Наука, 2015. — 448 с.

### Информация об авторе

**Мазурова Ольга Васильевна** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН; Scopus Author ID: 6602588810 (Российская Федерация, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, 342; e-mail: ol.mazurova@yandex.ru).

For citation: Mazurova, O. V. (2019). Comparative efficiency of motor fuels and electricity for automobile transport. *Ekonomika Regiona [Economy of Region]*, 15(2), 493-505

**O. V. Mazurova**

Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of RAS (Irkutsk, Russian Federation; e-mail: ol.mazurova@yandex.ru)

### Comparative Efficiency of Motor Fuels and Electricity for Automobile Transport

*The article presents estimates regarding the scale of changes arising from the mass introduction of electric vehicles. The relevance of this paper is determined by the increasing demands for the environmental cleanliness of transport energy sources. It is obvious that in the future alternative fuel vehicles will crowd out oil fuel transport. I propose an original approach to the economic evaluation of the alternative resources' use in transport taking into account regional conditions and initial data's uncertainty. It allows comparing new technologies in transport and choosing the most efficient options for power supply of passengers and freight vehicles in the country's different regions. The main feature of the proposed model is the combination of optimization and simulation methods based on the Monte Carlo technique. The study identifies the trends in the dynamics of motorization and the structure of energy resources in the transport sector and assesses the possible consequences of the electric vehicles' introduction in Russia. It also includes the results of experimental calculations using various combinations of expected conditions and forecasting prices in accordance with the demand for motor fuel in major macro regions of Russia. The article has demonstrated that the economic efficiency of the use of alternative fuels and energy in transport will depend on regional characteristics, in particular, on the dynamics of changes in prices for energy resources. The proposed methodological approach and the results obtained can be useful in studying the problems of the power industry development.*

**Keywords:** competitiveness, energy demand, price, region, energy markets, emissions, forecast, road transport, electric transport, electric vehicle, alternative energy sources

### Acknowledgments

*The article has been prepared with the support of the Russian Foundation for Basic Research (the projects No. 17-06-00102-a, 18-010-00176-a).*

### References

1. *Transport Outlook 2050* (2012). Seamless Transport for Greener. Growth OECD/ITF, Paris, 60.
2. *Global Transport Scenarios 2050* (2011). World Energy Council Regency House, London, 76.
3. Makarov, A. A. (Ed.) (2013). *Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii do 2040 goda [Global and Russian Energy Outlook to 2040]*. Moscow: INEI RAS, ATSPR Publ., 110. (In Russ.)

4. Sinyak, Yu. V. & Kolpakov, A. Yu. (2012). Effektivnost proizvodstva sinteticheskikh motornykh topliv iz prirodnogo gaza [Economic efficiency of synthetic motor fuels from natural gas]. *Problemy prognozirovaniya [Studies on Russian economic development]*, 1, 38–48. (In Russ.)
5. Prasertsria, W., Frauzemb, R., Suriyaphradilok, U. & Ganib, R. (2016). Sustainable DME synthesis-design with CO2 utilization. *Proceedings of the 26th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, 1081–1086. DOI: 10.1016/B978-0-444-63428-3.50185-5.
6. Hinze, J. F., Nellis, G. F. & Anderson, M. H. (2017). Cost comparison of printed circuit heat exchanger to low cost periodic flow regenerator for use as recuperator in a s-CO2 Brayton cycle. *Applied Energy*, 208, 1150–1161. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.037.
7. Lao, J. M., Montoya, F. G., Montoya, M. G. & Manzano-Agugliaro, F. (2017). Electric vehicles in Spain: An overview of charging systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 970–983. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.239.
8. Timatkov, V. V. (2015). *Elektrotransport kak chast elektricheskogo mira. Fakty i prognozy [Electric transport as a part of the electrical world. Facts and forecasts]*. Moscow: Energy, 48. (In Russ.)
9. Parsons, G. R., Hidrue, M. K., Kempton, W. & Gardner, M. P. (2014). Willingness to pay for vehicle-to-grid (V2G) electric vehicles and their contract terms. *Energy Economics*, 42, 313–324. DOI: 10.1016/j.eneco.2013.12.018.
10. Udrene, L. & Bazbauers, G. (2015). Role of vehicle-to-grid systems for electric load shifting and integration of intermittent sources in Latvian power system. *Energy Procedia*, 72, 156–162. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.06.022.
11. *World Energy Outlook*. (2016). International Energy Agency OECD/IEA, Paris, 684.
12. Bubeck, S., Tomaschek, J. & Fahl, U. (2016). Perspectives of electric mobility: Total cost of ownership of electric vehicles in Germany. *Transport Policy*, 50, 63–77. DOI: 10.1016/j.tranpol.2016.05.012.
13. Figenbaum, E. (2017). Perspectives on Norway's supercharged electric vehicle policy. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 25, 14–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eist.2016.11.002>.
14. Zhan, X., Liang, Y., Yu, E., Rao, R. & Xie, J. (2017). Review of electric vehicle policies in China: Content summary and effect analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 698–714. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.250.
15. Wesseling, J. H. (2016). Explaining variance in national electric vehicle policies. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 21, 28–38. DOI: 10.1016/j.eist.2016.03.001.
16. Yong, T. & Park, C. (2017). A qualitative comparative analysis on factors affecting the deployment of electric vehicles. *Energy Procedia*, 128, 497–503.
17. Zhang, Y., Yu, Y. & Zou, B. (2011). Analyzing public awareness and acceptance of alternative fuel vehicles in China: The case of EV. *Energy Policy*, 39(11), 7015–7024. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.07.055.
18. Konyaev, S. V., Romanov, K. V., Akopova, G. S., Vlasenko, N. L., Sharihinina, L. V. & Teterevlev, R. V. (2012). *Ekologo-ekonomicheskii analiz ispolzovaniya razlichnykh vidov topliva na obektakh neftegazovogo kompleksa [Ecological and economic analysis of the use of various types of fuel at oil and gas facilities]*. Moscow: Gazprom VNIIGAZ Publ., 129. (In Russ.)
19. Danilov, A. M., Kaminskiy, E. F. & Khavkin, V. A. (2003). Alternativnye topliva: dostoinstva i nedostatki. Problemy primeneniya [Alternative fuels: advantages and disadvantages. Problems of application], *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal [Russian Journal of General Chemistry]*, XLVII, 6, 4–11. (In Russ.)
20. Shekhovtsev, A. A. & Chizhov, S. G. (2009). Vozdeystvie predpriyatiy toplivno-energeticheskogo kompleksa na okruzhayushchuyu sredu [Influence of the power industry business on environment]. *Energeticheskaya politika [The energy policy]*, 1, 32–42. (In Russ.)
21. Braginskiy, O. B. (2008). Alternativnye motornye topliva: mirovye tendentsii i vybor dlya Rossii [Alternative motor fuels: world trends and choices for Russia], *Rossiyskiy khimicheskii zhurnal [Russian Journal of General Chemistry]*, LII, 6, 137–146. (In Russ.)
22. Sinyak, Yu. V. & Kolpakov, A. Yu. (2012). Ekonomicheskie otsenki ispolzovaniya v avtotransporte alternativnykh motornykh topliv na baze prirodnogo gaza [Comparative economics of alternative motor fuels from natural gas used by motor vehicles]. *Problemy prognozirovaniya, [Studies on Russian economic development]*, 2, 36–46. (In Russ.)
23. Stasaytis, A. V. (2008). Perspektivy razvitiya rynka AGZS v Rossii [Prospects for the development of the gas station market in Russia], *Transport na alternativnom toplive [Alternative fuel transport]*, 1, 22–28. (In Russ.)
24. Pronin, E. N. (2007). Prirodnyy gaz — motornoe toplivo XXI veka [Natural gas — motor fuel of the XXI century]. *Transport Rossiyskoy Federatsii [Transport of the Russian Federation]*, 10, 12–14. (In Russ.)
25. Volkov, V. S., Kaplun, S. V. & Zerya, A. V. (2008). Novoe oborudovanie dlya ispolzovaniya metana v kachestve motornogo topliva [New equipment for the use of methane as a motor fuel]. *Transport na alternativnom toplive [Alternative fuel transport]*, 1, 40–43. (In Russ.)
26. Tsyuplev, D. Yu. (2012). Vliyaniye razvitiya elektrotransporta na ee energeticheskie sistemy [Effect of the development of electric vehicles on energy systems]. *Energeticheskaya politika [The energy policy]*, 1, 58–64. (In Russ.)
27. Batenin, V. M., Bushuev, V. V. & Voropay, N. I. (2017). *Innovatsionnaya elektroenergetika — 21 [Innovative Electricity — 21]*. Moscow: Energy Publ., 584. (In Russ.)
28. Bushuev, V. V. & Afanaseva, M. V. (2013). Energetika novogo pokoleniya [New age of energy sector]. *Energeticheskaya politika [The energy policy]*, 6, 16–21. (In Russ.)
29. Kononov, Yu. D., Galperova, E. V., Mazurova, O. V., et al. (2009). *Metody i modeli prognoznykh issledovaniy vzaimosvyazey energetiki i ekonomiki [Methods and models of predictive studies of the interrelations of energy and economy]*. Novosibirsk: Nauka Publ., 178. (In Russ.)



30. Voropay, N. I., Podkovalnikov, S. V., Trufanov, V. V., Mazurova, O. V, et. al. (2015). *Obosnovanie razvitiya elektroenergeticheskikh sistem: metodologiya, modeli, metody, ikh ispolzovanie [Rationale for the development of electric power systems: methodology, models, methods, their use]*. Novosibirsk: Nauka Publ., 448. (In Russ.)

#### **Author**

**Olga Vasilevna Mazurova** — PhD in Engineering, Senior Research Associate, Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of RAS; Scopus Author ID: 6602588810 (432, 130, Lermontov st., Irkutsk, 664033, Russian Federation; e-mail: ol.mazurova@yandex.ru).