

О. В. Мазурова ^{а)}, Е. В. Гальперова ^{б)}, В. И. Локтионов ^{в)}^{а, б, в)} Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация^{а)} <https://orcid.org/0000-0002-8912-0070>, e-mail: ol.mazurova@yandex.ru^{б)} <https://orcid.org/0000-0001-6749-8630>^{в)} <https://orcid.org/0000-0001-8478-3222>

Перспективная оценка спроса на электроэнергию в РФ и регионах с учетом углубленной электрификации¹

Расширение электрификации всех сфер деятельности признано одним из ключевых приоритетов в мире и нашло отражение в Энергетической стратегии России. Целью настоящего исследования является перспективная оценка спроса на электроэнергию в стране при реализации возможных направлений электрификации в секторах экономики. В статье представлены поэтапная схема и краткое описание моделей методического подхода к долгосрочной оценке спроса на энергоносители, который позволяет учесть влияние сложных взаимосвязей в социальной, экономической и технологической политике. Особенностью подхода является акцент исследований на уровне регионов, где происходит согласование интересов производителей и потребителей энергии. Приводится анализ современного состояния и перспективных направлений использования электроэнергии в разных секторах экономики РФ и ее регионах с использованием новых статистических данных и прогнозов. Показано, что секторальная и территориальная структура электропотребления отличаются стабильностью, наблюдаются снижение и сближение значений электроемкости ВРП регионов, а электропотребление регионов различается из-за существенных особенностей в отраслевой специализации и уровне жизни населения. Наибольшее электропотребление приходится на развитые регионы (Центральный ФО), либо регионы с большой долей электроемких производств (Сибирский ФО). В соответствии с принятым сценарием развития экономики и расширением электрификации на период 2025–2040 гг., можно ожидать, что спрос на электроэнергию в регионах будет увеличиваться со среднегодовыми темпами прироста 1,4–1,8 %. Наибольшие темпы прироста электропотребления ожидаются в Сибирском ФО и Дальневосточном ФО, они обусловлены ускоренным развитием этих территорий. Прогноз динамики электроемкости ВВП России демонстрирует соответствие глобальным тенденциям. Полученные результаты могут использоваться в качестве ориентира при разработке программ и стратегий развития экономики и энергетики страны и регионов.

Ключевые слова: топливно-энергетический комплекс, энергоемкость, экономический рост, модель экономики, модель энергетики, социально-экономическое развитие, прогнозирование, спрос на электроэнергию, электрификация, энергопотребление, энергоэффективность

Благодарность

Исследование выполнено в рамках проекта государственного задания (№ FWEU-2021-0003 рег. номер АААА-А21-121012090014-5) программы фундаментальных исследований РФ на 2021-2030 гг. и при частичной финансовой поддержке РФФИ научных проектов № 18-010-00176 и № 20-010-00204.

Для цитирования: Мазурова О. В., Гальперова Е. В., Локтионов В. И. Перспективная оценка спроса на электроэнергию в РФ и регионах с учетом углубленной электрификации // Экономика региона. 2022. Т. 18, вып. 2. С. 528-541. <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2022-2-16>.

¹ © Мазурова О. В., Гальперова Е. В., Локтионов В. И. Текст. 2022.

RESEARCH ARTICLE

Olga V. Mazurova ^{a)}, Elena V. Galperova ^{b)}, Vadim I. Loktionov ^{c)}^{a, b, c)} Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russian Federation^{a)} <https://orcid.org/0000-0002-8912-0070>, e-mail: ol.mazurova@yandex.ru^{b)} <https://orcid.org/0000-0001-6749-8630>^{c)} <https://orcid.org/0000-0001-8478-3222>**Forecasting Electricity Demand in the Russian Federation and Its Regions Taking Into Account Electrification Expansion**

A global priority of electrification expansion in all areas is also stated in the Energy Strategy of the Russian Federation. The study aims to forecast electricity demand in Russia taking into account possible electrification options in economic sectors. The article presents a multi-stage procedure and a concise review of methodological approaches to the long-term assessment of electricity demand, which considers the impact of complex interrelationships in social, economic and technological policies. In particular, this approach focuses on the regional level, where the interests of energy producers and consumers are reconciled. The current and promising directions of electricity use in Russian regions and economic sectors were analysed based on various statistics and forecasts. The conducted analysis demonstrated the stability of sectoral and territorial energy consumption patterns, as well as a decrease and convergence of values of gross regional product (GRP) energy intensity. Energy consumption of regions varies due to significant differences in industrial specialisation and living standards of the population. The highest energy consumption is observed in developed regions (Central Federal District) or regions with a large share of energy-intensive industries (Siberian Federal District). According to the accepted economic development and electrification expansion strategies for the period 2025–2040, on average, electricity demand in Russian regions is expected to increase by 1.4–1.8 % annually. It is anticipated that the Siberian and Far Eastern Federal Districts will show the highest growth rates of energy consumption due to the accelerated development of these territories. Predicted dynamics of the gross domestic product (GDP) energy intensity in Russia confirms its compliance with global trends. The research findings may prove useful in creating programmes and development strategies for the country and its regions.

Keywords: energy sector, energy intensity, economic growth, economic model, energy model, social and economic development, forecasts, electricity demand, electrification, energy consumption, energy efficiency

Acknowledgments

The article has been prepared in the framework of the State Assignment Project (No. FWEU-2021-0003 Reg. No. AAAA-A21-121012090014-5) of the Fundamental Research Program of the Russian Federation 2021-2030; it was also partially financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (the projects No. 18-010-00176 and No. 20-010-00204).

For citation: Mazurova, O. V., Galperova, E. V. & Loktionov, V. I. (2022). Forecasting Electricity Demand in the Russian Federation and Its Regions Taking Into Account Electrification Expansion. *Ekonomika regiona [Economy of regions]*, 18(2), 528-541, <https://doi.org/10.17059/ekon.reg.2022-2-16>.

Введение

Использование электроэнергии является неотъемлемой составляющей экономической и повседневной жизни, а ее место и значение растут с развитием технологий и повышением уровня жизни населения. Технический прогресс и рост благосостояния меняют производственную структуру отраслей и потребительские привычки населения в сторону более широкого использования электроэнергии (Энергетика России..., 2016).

Электрификация — это долгосрочный тренд во всех странах мира, представляющий собой переход на более эффективный и универсальный энергоноситель в разных секторах потребления.

В последние десятилетия спрос на электроэнергию опережает другие виды энергоносителей. За период 1990—2018 гг. потребление электроэнергии в мире увеличилось более чем в 1,8 раза¹ за счет активной электрификации всех секторов экономики, развития информационно-коммуникационных технологий, увеличения парка портативных электронных устройств, электромобилей и др. (Инновационная электроэнергетика — 21, 2017). Анализ российских и зарубежных прогнозов²

¹ International Energy Outlook 2019 (IEA). URL: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/> (дата обращения: 2.06.2020).

² World Energy Outlook / International Energy Agency. Paris: OECD/IEA, 2017

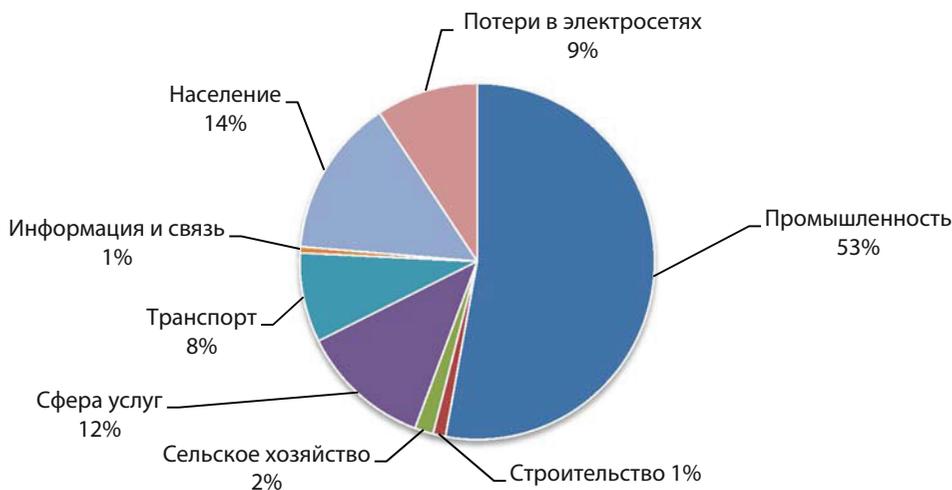


Рис. 1. Структура электропотребления в России в 2018 г. (источник: построено авторами по данным Росстата)
Fig. 1. Energy consumption pattern in Russia, 2018

(Прогноз развития энергетики мира и России, 2019) показывает, что в перспективе к 2040—2050 гг. спрос на электроэнергию в мире может возрасти вдвое, в частности за счет появления новых направлений.

Вопросам исследования и прогнозирования спроса на электроэнергию уделяется достаточно большое внимание в нашей стране и за рубежом. Например, Министерство энергетики США ежегодно разрабатывает прогнозы развития энергетики на долгосрочную перспективу, где особое внимание уделяется прогнозной оценке спроса на энергоносители, в т. ч. электроэнергии¹.

Целью представленного исследования являются анализ перспективных направлений использования электроэнергии в разных секторах экономики и оценка спроса на электроэнергию в РФ и ее регионах с учетом углубленной электрификации на перспективу до 2040 г.

Использование электроэнергии в разных секторах экономики РФ

За период 2000—2019 гг. потребление электроэнергии в России увеличилось почти на 25 % и составило в 2019 г. 1075 млрд кВт·ч. Динамика электропотребления тесно связана с экономической ситуацией в стране. Как показывают данные таблицы 1, темпы прироста спроса на электроэнергию растут с повышением экономической активности и снижаются при появлении кризисных явлений. Потребление электроэнергии на единицу ВВП (электроёмкость ВВП) в России снизилось более, чем на 30 % и составило 0,25 кВт·ч/долл.

¹ Annual Energy Outlook 2020. URL: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/> (дата обращения: 12.01.2021).

Таблица 1

Динамика среднегодовых темпов изменения электропотребления и ВВП в России за 2000—2019 гг., %

Table 1

Dynamics of the average annual change in electricity consumption and GDP in Russia for 2000–2019, %

Показатель	Темп прироста			
	2000–2005	2006–2010	2011–2015	2016–2019
ВВП	11,1	11,5	3,8	5,2
Потребление электроэнергии	1,6	1,7	0,3	0,9

Источники: Данные Росстата (Регионы России. Социально-экономические показатели. 2019: Стат. сб. / Росстат. М., 2019. 1204 с.; Электробаланс РФ. URL: http://old.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/enterprise/industrial/# (дата обращения 26.05.2020)) и расчеты авторов.

(по ППС). Это явилось результатом структурных изменений в сторону снижения доли электроемких видов экономической деятельности и расширения применения энергосберегающих технологий.

Структура электропотребления в стране отличается стабильностью. За последние 10 лет доля промышленности несколько снизилась (с 56 % в 2008 г. до 53 % к 2018 г.) в основном за счет увеличения удельного веса сектора услуг и домашних хозяйств (рис. 1).

Электропотребление в промышленности РФ практически не изменилось за период 2008—2018 гг., прирост составил чуть более 3 %. Это связано, в частности, с низкими темпами производства и недостаточным уровнем электрификации в обрабатывающих отраслях промышленности (машиностроении, химическом комплексе, производстве стройматериалов и др.) (Мазурова, 2017). В перспективе можно ожидать расширения спектра направ-

лений использования электроэнергии за счет развития интеллектуальных технологий, электроники, робототехники, нанотехнологий и т. д. (Энергетика России: постстратегический взгляд..., 2016).

В сельском хозяйстве неуклонно повышается уровень электропотребления, обусловленный оснащением предприятий электрическими двигателями, автоматическими устройствами. За последнее десятилетие потребление электроэнергии в сельском хозяйстве РФ увеличилось с 15,5 млрд кВт·ч в 2008 г. до 18,8 млрд кВт·ч в 2018 г., то есть на 21 %. В будущем благодаря автоматизации технологических процессов будет расширяться электрификация теплично-парникового производства, растениеводства, переработки сельскохозяйственной продукции и т. п.

На долю транспорта в 2018 г. приходилось 8,1 % суммарного электропотребления или 90,0 млрд кВт·ч. При этом почти 60 % расходуется на железнодорожном и городском электротранспорте.

В последние годы все большее распространение в мире получает перевод автомобильного транспорта на электрическую энергию (Mengnuo, 2018; Figenbaum, 2018). Электрификация транспорта охватывает легковые автомобили, автобусы, спецтехнику, а также гибридные транспортные средства (Hove, 2019; Gong, 2013). В 2019 г. общее количество электромобилей в мире достигло 8 млн ед. В соответствии с прогнозом Международного энергетического агентства (МЭА)¹, количество электромобилей в мире будет возрастать примерно на 50 % в год и составит к 2025 г. 30 млн ед.

Развитие рынка электромобилей в России и ее регионах будет способствовать решению проблемы вредных выбросов и чистоты окружающей среды, особенно в крупных городах.

Особую роль электроэнергия играет в повышении комфортных условий жизни людей. За период 2008—2018 гг. электропотребление населением РФ увеличилось на 36 %. Электрификация быта повышает уровень автоматизации процессов ведения хозяйства и улучшает санитарно-гигиенические условия в жилищах. В перспективе потребность в электроэнергии в домашних хозяйствах будет формироваться под влиянием разнонаправленных факторов:

— увеличение спроса на электроэнергию за счет повышения уровня жизни населения (в том числе расширения малоэтажного индивидуального строительства), размеров освещаемой площади и количества разного вида приборов;

— снижение потребления электроэнергии в результате широкого распространения энергосберегающих технологий, новых модификаций приборов с пониженным энергопотреблением, системы «умный дом» и др.

Экономическое развитие регионов РФ и электропотребление

Регионы России существенно отличаются друг от друга по экономическим, демографическим, природным, климатическим и др. характеристикам. Неоднородность регионального развития обусловлена в основном исторически сложившимся территориально-производственным разделением труда (табл. 2). Происходившие в последние десятилетия экономико-политические трансформации не внесли значительного изменения в это разделение.

В 2018 г. на долю Центрального, Северо-Западного, Приволжского и Уральского федеральных округов приходилось около 75 % ВРП и почти 80 % суммарных инвестиций в основной капитал. Существующие социально-экономические различия территорий определяют структуру территориального электропотребления. В 2018 г. в России четыре федеральных округа имели примерно равные доли: Центральный, Приволжский, Уральский и Сибирский, и в сумме на них приходилось 75 % объема использования электроэнергии (рис. 2).

Центральный федеральный округ с самой высокой численностью населения (26,8 %) и наибольшим вкладом в формирование ВВП страны (34,9 %) занимает первую строчку в структуре электропотребления страны (20,5 %). На втором месте Сибирский ФО. Высокая его позиция определяется, прежде всего, доминированием в структуре экономики промышленных производств с электроемкими видами продукции (в основном, это металлургия). В сравнении с Центральным ФО доля Сибирского ФО по численности населения меньше в 2,3 раза, а по ВВП — в 3,3 раза (табл. 3).

За период 2000—2017 гг. наблюдается очевидное снижение и сближение значений электроемкости ВРП регионов (рис. 3). Это является результатом изменений в производственной

¹ World Energy Outlook / International Energy Agency. Paris: OECD/IEA, 2017

Основные социально-экономические показатели регионов в 2018 г.

The main socio-economic indicators of regions, 2018

Федеральный округ	Численность населения, млн чел.	Душевой ВРП*, тыс. руб./чел.	Душевые доходы, тыс. руб./чел. в месяц	Обеспеченность жилой площадью, м ² /чел.	Инвестиции в основной капитал, млрд руб.
Центральный	39,4	666,4	43,7	27,0	4872,6
Северо-Западный	14,0	588,5	36,2	27,5	2088,9
Южный	16,5	326,2	28,5	24,7	1406,3
Северо-Кавказский	9,9	190,3	23,3	21,5	550,9
Приволжский	29,4	372,7	26,7	26,7	2467,8
Уральский	12,4	864,5	35,0	25,4	2931,3
Сибирский	17,2	401,8	25,6	24,6	1574,2
Дальневосточный	8,2	628,2	35,5	23,4	1394,5
РФ	146,8	707,5	33,2	25,8	15 711,5

Источники: данные Росстата.

Примечание: * 2017 г.

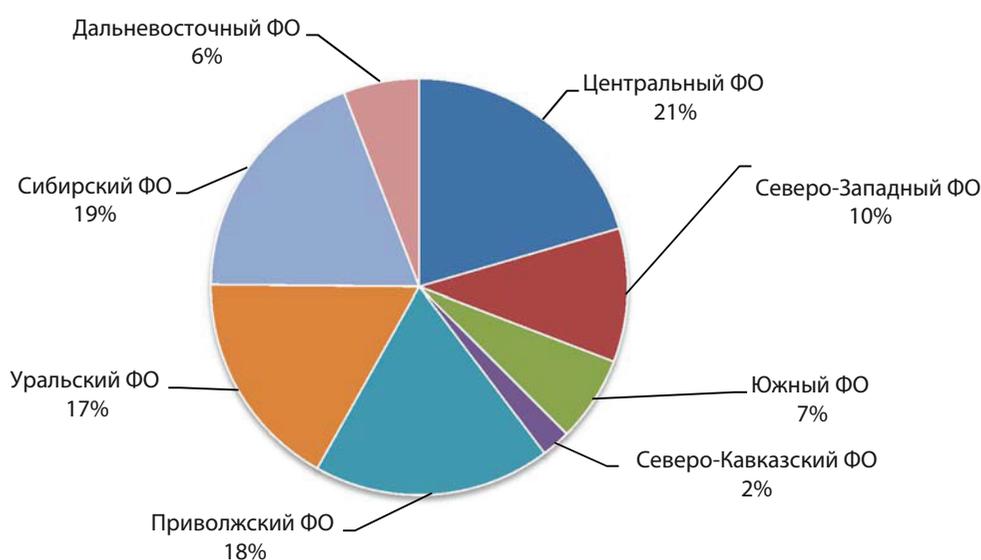


Рис. 2. Региональная структура электропотребления в России (по федеральным округам) в 2018 г. (источник: построено авторами по данным Росстата)

Fig. 2. Regional energy consumption pattern in Russia, 2018

Доля регионов в отдельных общероссийских показателях в 2018 г., %

The share of regions in some all-Russian indicators, 2018, %

Федеральный округ	Доля в численности населения	Доля в ВРП*	Доля в электропотреблении
Центральный	26,8	34,9	20,5
Северо-Западный	9,5	10,9	10,3
Южный	11,2	7,2	6,6
Северо-Кавказский	6,7	2,5	2,3
Приволжский	20,0	14,7	18,4
Уральский	8,4	14,3	17,0
Сибирский	11,7	10,4	19,0
Дальневосточный	5,6	5,2	5,9
РФ	100	100	100

Источники: данные Росстата.

Примечание: * 2017 г.

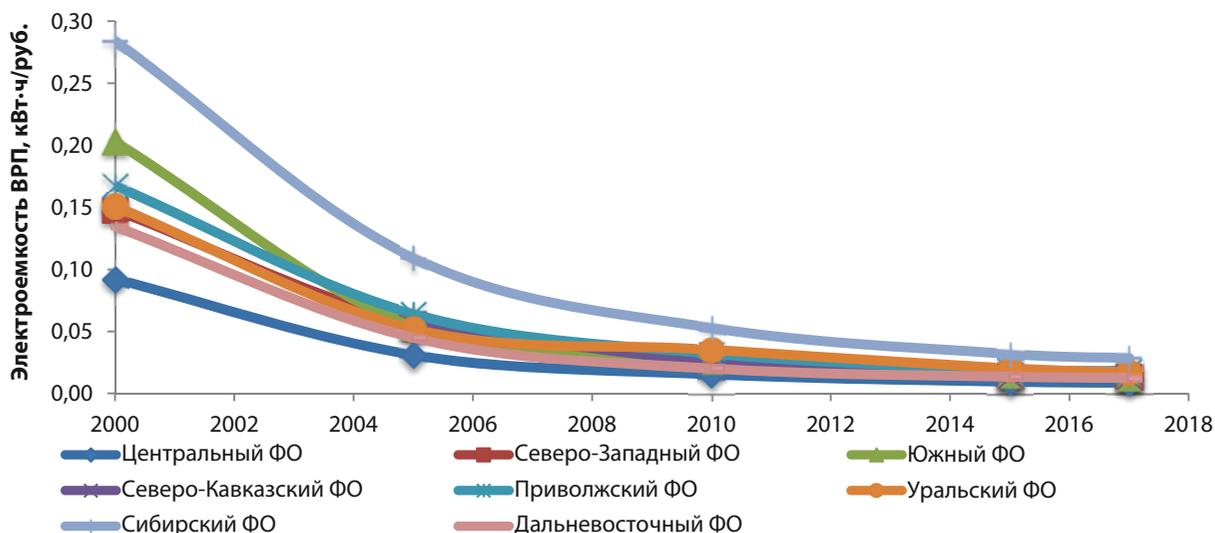


Рис. 3. Динамика электроёмкости ВРП по федеральным округам РФ (период 2000–2017 гг.) (источники: данные Росстата и расчеты авторов)

Fig. 3. Dynamics of GRP energy intensity by federal districts of the Russian Federation, 2000–2017

и территориальной структуре, а также мерами, направленными на энергосбережение.

За период 2008–2018 гг. темпы роста электропотребления в целом по РФ были 0,8 %, в разрезе федеральных округов они составили: в Центральном округе — 1,07 %, в Северо-Западном — 1,05 %, в Южном — 2,04 %, в Северо-Кавказском — 0,47 %, в Приволжском — 0,69 %, в Уральском — 0,58 %, в Сибирском — 0,06 %, в Дальневосточном — 1,87 %. Максимальные темпы прироста электропотребления в Южном и Дальневосточном федеральных округах обоснованы, в первую очередь, изменением состава субъектов, входящих в округа: в Южном ФО — вхождением в его состав Республики Крым, а в Дальневосточном — присоединением Республики Бурятия и Забайкальского края. Самые низкие темпы прироста электропотребления в Сибирском федеральном округе, они объясняются снижением спроса на продукцию металлургии (алюминия, стали) на мировом рынке, низким уровнем жизни населения (по уровню душевых доходов населения округ занимает предпоследнее место), а также изменениями в составе субъектов, входящих в округ.

Душевое электропотребление различается по территориям в основном из-за существенных особенностей в отраслевой специализации и уровне жизни населения (рис. 4). В Уральском ФО и Сибирском ФО наблюдается самый высокий уровень потребления электроэнергии в расчете на одного жителя за счет высокой доли электроёмких производств в региональной структуре.

Существующие подходы и методы исследования

Для прогнозных исследований спроса на энергоносители применяются различные методы и модели (см. подробнее (Обоснование развития ..., 2015)):

- метод экспертных оценок (*Delphi method*) базируется на профессиональном, практическом и научном опыте одного или группы специалистов;

- метод анализа долгосрочных тенденций позволяет выявить наиболее устойчивые закономерности и тенденции в результате исследования ретроспективных показателей энергопотребления с целью их последующей экстраполяции на перспективу;

- метод межстрановых сравнений и аналогий используется для прогнозирования динамики энергоёмкости (электроёмкости) валового внутреннего продукта и отдельных отраслей экономики, душевого энергопотребления (электропотребления) и других показателей на основе общих закономерностей и схожих тенденций в различных странах мира;

- метод «затраты — выпуск» (*Input-output analysis*) опирается на межотраслевой баланс В. В. Леонтьева и используется для исследования межотраслевых взаимосвязей экономики и энергетики (Шапот, 2018);

- методы имитационного и оптимизационного моделирования применяются для построения моделей на основе предварительного изучения объекта и процессов, выделения их существенных признаков и характеристик (Рассел, 2006; Сидоренко, 2008).

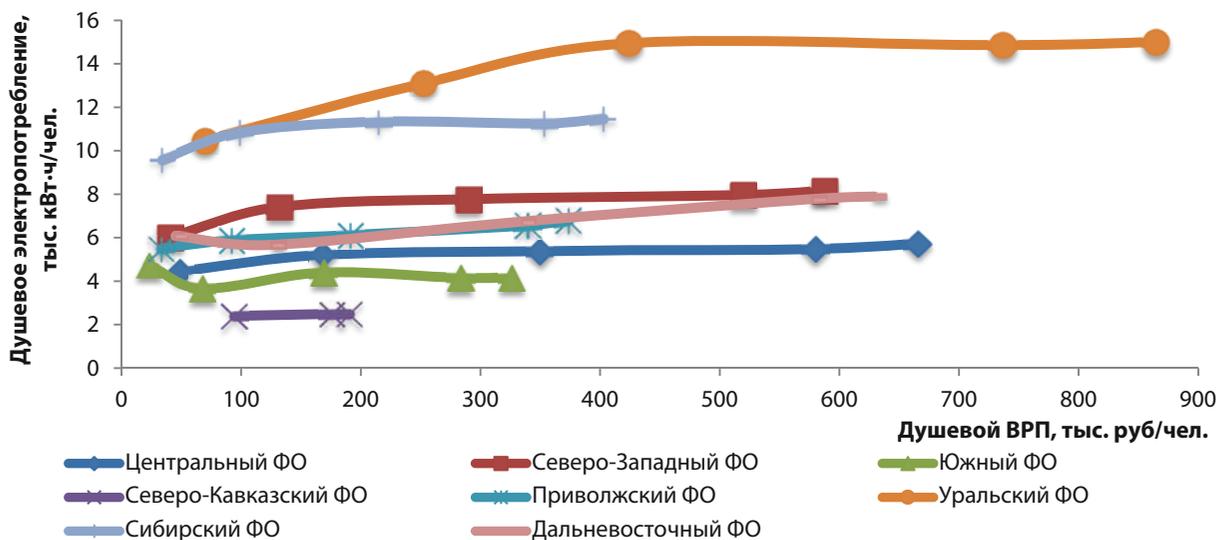


Рис. 4. Взаимосвязь душевого потребления электроэнергии и душевого ВРП по федеральным округам РФ, 2000–2017 гг. (источники: данные Росстата и расчеты авторов)

Fig. 4. The relationship between per capita energy consumption and per capita GRP by federal districts of the Russian Federation, 2000–2017

Основным методическим инструментарием прогнозных исследований спроса на энергоносители являются регрессионные, имитационные, балансовые, оптимизационные модели, часто интегрированные в единый вычислительный комплекс с моделями развития энергетики (Малахов, 2009; Кононов, 2018). Наиболее известными модельно-информационными комплексами являются комплексы европейских стран Market allocation model (Bhattacharyya, 2010), Price-Induced Market Equilibrium System (Mantzou, 1999), США (National Energy Modeling System¹), России (Super Complex For Active Navigation in Energy Research²) и др. (Messner, 1984; Schlentzig, 1996).

Методология прогнозирования спроса на энергоносители развивается в направлении все более полного учета факторов и взаимосвязей, влияющих на ее динамику. Необходимость дальнейшего развития методологии вызвана новыми приоритетами энергетической политики и меняющимися экономическими условиями. Это, в первую очередь, связано с ускорением научно-технического прогресса, цифровизацией и электрификацией всех секторов экономики, усилением влияния ценовой политики, ростом неопределенности будущих условий и т. д. (Кононов, 2020; Mansour, 2018). Очевидно, что объективная неоднозначность

и изменчивость факторов, влияющих на масштабы и структуру производства и потребления энергоресурсов, потребуют серьезного развития методов их оценки.

Методический подход и краткое описание моделей

В ИСЭМ СО РАН³ разработаны и постоянно совершенствуются методический подход и инструментарий в виде комплекса моделей для многофакторных исследований перспективной динамики спроса на энергоносители в условиях растущей неопределенности развития и энергоснабжения страны и ее регионов (Системные исследования..., 2010). Подход базируется на увязке задачи прогнозирования спроса на энергоносители с исследованиями развития экономики, энергетики и ценообразованием в ТЭК. Особенностью подхода является перенесение акцента исследований с уровня страны на уровень регионов, где происходит согласование интересов производителей и потребителей энергии (Гальперова, 2016).

В рамках данного подхода выделяются два уровня прогноза. На верхнем уровне оценивается динамика спроса на электроэнергию в стране в целом на основе сценариев экономического развития страны. На нижнем уровне формируется динамика спроса на электроэнергию в территориальном разрезе. Для нее в качестве отправной точки используются сценарии развития экономики и полученные оценки

¹ The National Energy Modeling Systems. An Overview. Energy Information Administration. Washington, DC, 2009. URL: <http://www.eia.gov/forecasts/aeo/nems/overview/pdf/0581%202009%29.pdf> (дата обращения 21.05.2020).

² SCANNER. Модельно-информационный комплекс / ред. А.А. Макаров. М.: ИНЭИ РАН, 2011. 72 с.

³ Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ СО РАН).

электропотребления на уровне страны. Очевидно, что экономическая и политическая ситуация в стране оказывает существенное влияние на перспективы развития ее отдельных территорий. Неоднородность в экономическом развитии регионов страны, неравномерность в обеспеченности собственными энергоресурсами и возможностями их дополнительных поставок обуславливают существенные различия в конъюнктуре на региональных энергетических рынках, способные не только скорректировать полученную региональную структуру спроса на электроэнергию, но и повлиять на перспективные уровни ее использования по стране в целом (Методы и модели..., 2009). Дополнительно при долгосрочном прогнозировании следует учитывать влияние поведения активных потребителей на спрос на электроэнергию в региональной энергосистеме (Gal'perova, 2018).

Методический подход реализован в виде модельного комплекса и включает в себя межотраслевую модель экономики, модели конечного спроса на энергию, модели энергоснабжения крупных потребителей. На рисунке 5 представлена принципиальная схема методического подхода и используемые для ее реализации математические модели (1–6):

(1) Макроэкономическая модель построена на принципах межотраслевого баланса. Она описывает производственные связи между 25 видами экономической деятельности, включая отрасли промышленности, транспорта, сельского хозяйства, а также инвестиционные и экспортно-импортные связи (Методы и модели..., 2009). В макроэкономической модели основным критерием оценки является максимум конечного потребления товаров и услуг за период:

$$\sum_i \sum_j Y_i(t) \delta_i(t) \rightarrow \max, \quad (1)$$

где $Y_i(t)$ — потребление продукции i в году t ; $\delta_i(t)$ — норматив дисконта.

(2) Модель прогнозирования конечного спроса на электроэнергию состоит из нескольких блоков (Обоснование развития..., 2015), в которых оценивается потребность в электроэнергии отдельных отраслей экономики методом прямого счета:

$$E_i(t) = \sum_j e_{ij}(t) X_j(t), \quad (2)$$

где $E_i(t)$ — объем потребления энергоресурса i в году t ; e_{ij} — динамика удельных расходов энергоресурса j для отрасли i ; $X_j(t)$ — валовая продукция отрасли j в году t .

(3) Имитационная модель прогнозирования спроса на электроэнергию в непроизводственной сфере разработана для оценки спроса на электроэнергию в домашних хозяйствах и секторе услуг. В общем случае потребность в электроэнергии этих секторов определяется:

$$E(t) = \Psi(t) [f(t)(e_{от}(t)k + e_{осв}(t)) + \sum_i n_i N_i h_i], \quad (3)$$

где $E(t)$ — потребность в электроэнергии; $\Psi(t)$ — численность населения в году; $f(t)$ — обеспеченность населения площадью жилых или общественных зданий; $e_{от}(t)$ — удельный расход электроэнергии на отопление; k — доля площади зданий с электрообогревом; $e_{осв}(t)$ — удельный расход электроэнергии на освещение; n_i — обеспеченность прибором или оборудованием вида i ; N_i — средняя мощность прибора или оборудования; h_i — среднее число часов использования прибора или оборудования.

(4) Модель регионального спроса на электроэнергию используется для оценки динамики электропотребления в территориальном разрезе. Первоначально предполагается, что социально-экономическое развитие отдельных регионов осуществляется в соответствии с общими направлениями экономического развития страны, а динамика электропотребления на единицу ВВП и душу населения одинакова, как для страны в целом, так и для региона. Эта динамика далее корректируется с учетом специфических особенностей территориального развития, которые могут ее изменить (Гальперова, 2016).

(5) Комплекс имитационных стохастических моделей энергоснабжения разных групп потребителей энергии предназначен для долгосрочного прогнозирования конъюнктуры на региональных энергетических рынках (Кононов, 2011). Новизной моделей является комбинация методов оптимизации и техники Монте-Карло, которая позволяет определить наиболее эффективный вариант энергоснабжения данной группы потребителей энергии в регионе с учетом конкуренции разных видов топлива и электроэнергии и характера неопределенности будущих условий. Критерием оценки в моделях является минимизация средней цены производства продукции в регионе в условиях ее самокупаемости:

$$F = \sum_i \sum_e R_{eij} X_{eij} \rightarrow \min, \quad (4)$$

где X_{eij} — объемы производства продукции i с использованием энергоносителя e на установке j .

Исходные данные. Основные этапы расчетов

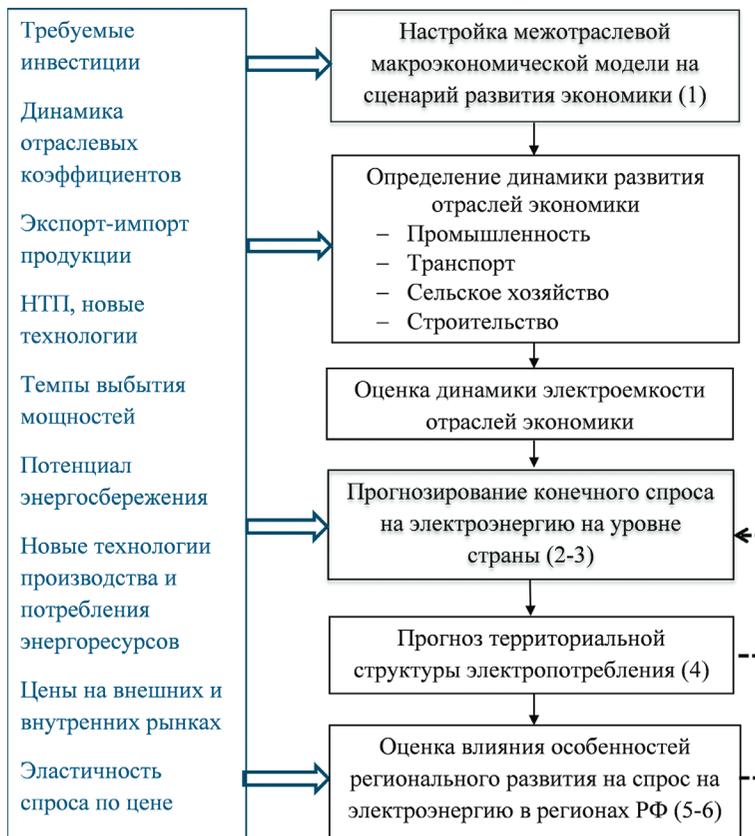


Рис. 5. Поэтапная схема прогнозирования спроса на электроэнергию в РФ и используемые модели (1–6) (источник: составлено авторами)

Fig. 5. A multi-stage procedure for forecasting electricity demand in the Russian Federation using models 1–6

$$R = \sigma_1 (c_{ei} b_{ej} + u_{ej}) + \sigma_2 \sigma k_{ei} / h_{ej}, \quad (5)$$

где R_{ej} — стоимость продукции i , произведенной на топливе e , руб/ед. прод., на установке j ; c_{ei} — стоимость энергоносителя e для потребителя i , руб/т у. т.; b_{ej} — расход энергии e на производство продукции i на оборудовании j т у. т./ед. прод.; k_{ej} — капиталоемкость производства продукции i на энергоносителе e на оборудовании j , руб/ед. мощн.; u_{ej} — себестоимость продукции без учета топливной составляющей i , произведенной на установке j , руб/ед. прод.; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma$ — корректирующие показатели.

(6) Агентная модель активного потребителя (Gal'perova, 2018) состоит из набора агентов, каждый из которых описывает возможности функционирования отдельного энергопотребляющего или генерирующего устройства потребителя (в стадии разработки). Активный потребитель стремится оптимизировать свое электропотребление, изменяя его объемы, и минимизировать расходы на энергоснабжение:

$$Z = c_t \sum_{i=1}^n e_i h_i \rightarrow \min, \quad (6)$$

где c_t — цена электроэнергии в централизованной сети; e_i — мощность установки i -го процесса электропотребления; n — количество электропотребляющих установок; h_i — число часов использования установки.

Прогнозирование спроса на электроэнергию — это многоэтапный итерационный процесс (рис. 5), при котором результаты последующих этапов могут потребовать корректировки предыдущих и новых циклов расчетов. Представленный инструментарий позволяет провести исследование по оценке перспективной динамики спроса на электроэнергию в условиях углубленной электрификации всех секторов экономики.

Для цели настоящего исследования применяются несколько моделей из модельного комплекса. В качестве базовой используется макроэкономическая межотраслевая модель, настроенная на параметры рассматриваемого сценария развития экономики (темпы ВВП, объемы конечного потребления, инвестиционных ресурсов, динамика численности населения и т. д.). В моделях конечного спроса на электроэнергию рассчитывается потребность в электроэнергии отдельно для произ-

Таблица 4

Основные параметры сценария развития экономики РФ

Table 4

The main parameters of the economic development scenario in Russia

Показатель	Единица измерения	Отчет 2018 г.	Прогноз, по периодам		
			2026–2030	2031–2035	2036–2040
Среднегодовые темпы прироста ВВП	%	—	4,2	4,1	3,9
Население	млн чел.	146,8	150,4	152,7	155,5
ВВП на душу населения	долл/чел.	7,5	9,9	10,3	10,4
Обеспеченность жилой площадью	м ² /чел.	25,2	33,7	36,9	40,0
Обеспеченность автомобилями	ед/тыс. чел.	296	410	530	650
Доля электромобилей в общей численности автомобилей	%	0,01	10	15	20

водственной сферы (промышленность, строительство, энергетика, сельское хозяйство, транспорт) и непродуцированной сферы (сектор услуг и домашних хозяйств). Потребность в электроэнергии по территориям определяется с помощью модели регионального спроса на электроэнергию. Далее эта потребность корректируется в соответствии с экономической, социальной, миграционной политикой развития отдельных регионов. На последнем этапе полученный прогноз электропотребления сравнивается с российскими прогнозами (если есть официальные прогнозы). Для его верификации динамика электроемкости на единицу ВВП (по ППС) и на душу населения сравнивается с мировыми тенденциями и прогнозами (Методы и модели, 2009).

Оценка долгосрочной динамики спроса на электроэнергию с учетом углубленной электрификации

На основе прогноза Минэкономразвития РФ¹ был сформирован сценарий развития российской экономики и энергетики до 2040 г. со среднегодовыми темпами роста ВВП 3,9–4,2 % в год, демографической политикой, направленной на повышение численности населения страны, а также с учетом расширения возможных направлений использования электроэнергии во всех секторах экономики (табл. 4).

Согласно выполненному прогнозу, к 2040 г. спрос на электроэнергию в РФ увеличится в 1,4

раза по сравнению с 2018 г. Опережающими темпами будет расти потребление электрической энергии на транспорте, в сельском хозяйстве, в непродуцированной сфере. В случае массового развития электромобилей и увеличения их численности с 13 млн ед. в 2030 г. до 24 млн ед. к 2040 г. дополнительный прирост спроса на электроэнергию составит к концу рассматриваемого периода 62 ТВт·ч. ли приблизительно 4 % от суммарного конечного электропотребления страны². В структуре потребления электроэнергии наибольший прирост ее доли предполагается в сфере услуг и домохозяйствах за счет повышенных требований к комфорту и качеству жизни населения, а также в транспортном секторе в случае крупномасштабного внедрения электромобилей и электробусов (рис. 6).

В таблице 5 представлена перспективная оценка спроса на электроэнергию в территориальном разрезе. Темпы роста электропотребления регионов России схожи со среднероссийскими темпами и составляют в среднем 1,4–1,8 %. Следует отметить, что темпы роста электропотребления в Сибирском ФО и Дальневосточном ФО превышают среднероссийские, это связано с реализацией Стратегии развития регионов Сибири и Дальнего Востока³.

В целом тенденция изменения динамики электроемкости ВВП РФ соответствует мировым тенденциям, однако ее значения будут выше, чем в европейских странах, Японии и США, из-за особенностей структуры произ-

¹ Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года. URL: http://economy.gov.ru/minrec/activity/sections/macro/prognoz/doc20130325_06 (дата обращения 6.05.2020); Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года. URL: <http://economy.gov.ru/minrec/about/structure/depmacro/201828113> (дата обращения 19.03.2020).

² Рассчитано без учета потребления электроэнергии на зарядных станциях.

³ Стратегия социально-экономического развития Дальнего Востока и Байкальского региона на период до 2025 г. URL: http://economy.gov.ru/minrec/activity/sections/econreg/investproject/doc20100309_011 (дата обращения 11.03.2020).

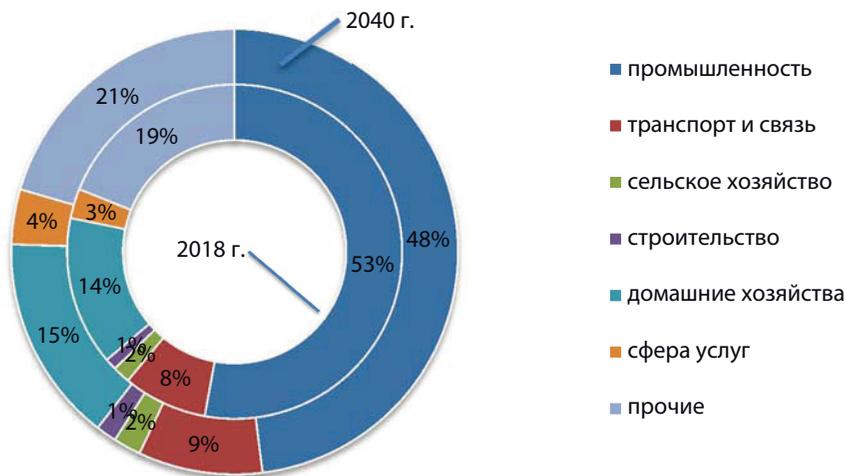


Рис. 6. Прогноз структуры спроса на электроэнергию по секторам экономики России на 2040 г., % (источник: оценка авторов)

Fig. 6. Forecasted electricity demand by economic sectors of Russia for 2040, %

Таблица 5
Прогноз динамики спроса на электроэнергию по регионам России на период до 2040 г., млрд кВт·ч

Table 5
Forecasted dynamics of electricity demand by Russian regions for the period until 2040, billion kWh

Федеральный округ	2018 г., отчет	Прогноз по периодам	
		2030 г.	2040 г.
РФ	1108,1	1490	1600
Центральный	227,1	307	332
Северо-Западный.	114,6	155	167
Южный	73,6	96	104
Северо-Кавказский	25,0	34	37
Приволжский	204,0	268	285
Уральский	188,6	247	259
Сибирский	210,0	289	314
Дальневосточный	65,3	91	102

Источник: данные Росстата и расчеты авторов.

водства, большой территории, сурового климата и других факторов, и будут приближаться к таким странам, как Канада¹ (рис. 7).

Заключение

Прогнозирование спроса на электроэнергию является важной задачей при принятии стратегических решений в области экономической политики и энергетической безопасности страны и ее регионов. В перспективе роль электроэнергии будет расширяться за счет развития новых направлений ее использования и цифровизации различных сфер экономической деятельности.

Исследование показало, что при принятых положениях рассматриваемого сценария

¹ International Energy Outlook 2019 (IEA). URL: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/> (дата обращения 15.04.2020).

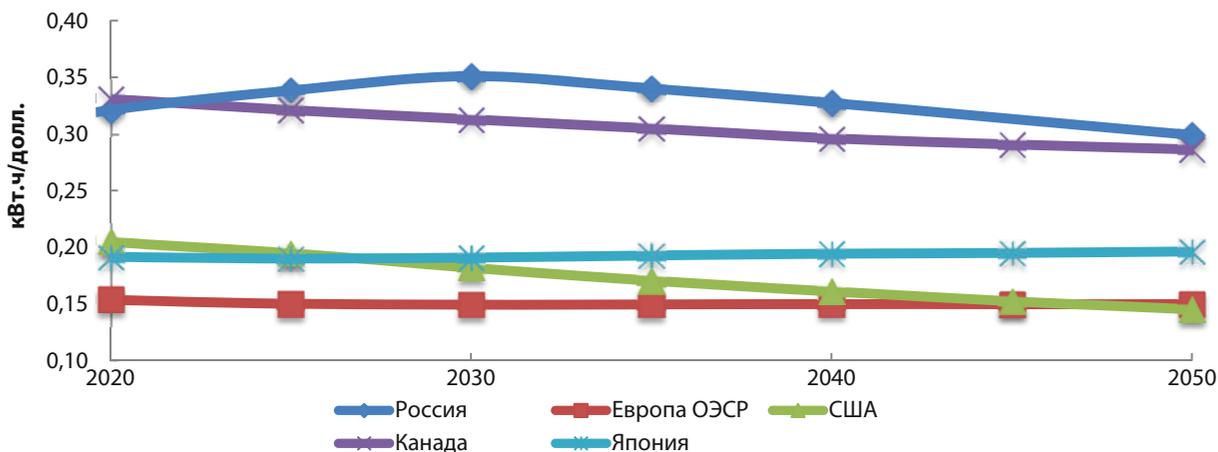


Рис. 7. Динамика электроёмкости ВВП России на фоне глобальных тенденций. Для России показан результат авторского прогноза до 2040 г. с продолжением тренда до 2050 г в соответствии с общемировыми тенденциями (источники: прогноз МЭА и оценка авторов)

Fig. 7. Dynamics of GDP energy intensity in Russia compared to global trends; for Russia, the author's forecast until 2040 is presented with a continuation until 2050 in accordance with global trends

развития экономики на период 2025–2040 гг. можно ожидать умеренного роста спроса на электроэнергию в регионах с разбросом ежегодных темпов прироста от 1,4 до 1,8 %. Повышенные темпы предусматриваются для Сибирского и Дальневосточного федеральных округов, обусловленные необходимостью ускоренного развития этих территорий с целью снижения различий их уровня жизни и уровня жизни европейских регионов и решения задач национальной безопасности.

В долгосрочной перспективе одним из новых факторов, способным существенно по-

влиять на спрос на электроэнергию в регионах, является развитие интеллектуальных систем. С применением цифровых технологий у потребителей появляется возможность не только управлять собственным электропотреблением, но и производить и поставлять электроэнергию в энергосистему. Ответ на вопрос, каким образом это отразится на будущем спросе на электроэнергию, является актуальной задачей, требующей разработки новых подходов к исследованию и оценке перспективной динамики спроса на электроэнергию в регионах.

Список источников

Гальперова Е. В. Методический подход к долгосрочному прогнозированию рыночного спроса на топливо и энергию с учетом региональных особенностей и роста неопределенности // Известия РАН. Энергетика. 2016. № 5. С. 33–44.

Инновационная электроэнергетика — 21 / В. М. Батенин, В. В. Бушуев, Н. И. Воропай и др. Москва : ИЦ «Энергия», 2017. 584 с.

Кононов Ю. Д., Тыртышный В. Н. Оценка влияния характера неопределенности будущих условий на конкурентоспособность вариантов топливоснабжения // Энергетическая политика. 2011. № 4. С. 90–94.

Кононов Ю. Д., Кононов Д. Ю. Анализ методов и моделей, используемых при оценке вариантов долгосрочного развития ТЭК // Энергетическая политика. 2018. № 3. С. 61–67.

Мазурова О. В. Электровооруженность промышленности как фактор качественного скачка в росте производительности труда // Промышленная энергетика. 2017. № 5. С. 2–8.

Малахов В. А. Подходы к прогнозированию спроса на электроэнергию в России // Проблемы прогнозирования. 2009. Т. 113, № 2. С. 57–62.

Методы и модели прогнозных исследований взаимосвязей энергетики и экономики / Ю. Д. Кононов, Д. Ю. Кононов и др. Новосибирск : Наука, 2009. 178 с.

Обоснование развития электроэнергетических систем. Методология, модели, методы, их использование / Н. И. Воропай, С. В. Подковальников, В. В. Труфанов и др.; отв. ред. Н. И. Воропай. Новосибирск : Наука, 2015. 448 с.

Прогноз развития энергетики мира и России 2019 / под ред. А. А. Макарова, Т. А. Митровой, В. А. Кулагина. Москва : Институт энергетических исследований РАН, 2019. 209 с.

Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход, 2-е изд.: пер. с англ. Москва : Издательский дом «Вильямс», 2006. 1408 с.

Сидоренко В. Н. Красносельский А. В. Имитационное моделирование в науке и бизнесе. Подходы, инструменты, применение // Бизнес-информатика. 2008. № 2 (08). С. 52–57.

Системные исследования в энергетике. Ретроспектива научных направлений СЭИ–ИСЭМ / отв. ред. Н. И. Воропай. Новосибирск : Наука, 2010. 686 с.

Шапот Д. В., Малахов В. А. Опыт развития методологии и разработки моделей межотраслевого баланса. Москва : Издательский дом МЭИ, 2018. 176 с.

Энергетика России. Постстратегический взгляд на 50 лет вперед / В. В. Бушуев, А. И. Громов, А. М. Белогорьев и др. Москва : ИАЦ «Энергия», 2016. 96 с.

Bhattacharyya S., Timilsina G. R. A Review of Energy System Models // International Journal of Energy Sector Management. 2010. Vol. No. 4. P. 494–518.

Figenbaum E. Perspectives on Norway's supercharged electric vehicle policy Environmental Innovation and Societal Transitions // Environmental Innovation and Societal Transitions. 2017. Vol. 25. P. 14–34. DOI: doi.org/10.1016/j.eist.2016.11.002.

Gal'perova E. V., Gal'perov V. I. Modeling the Active Consumer Behavior Based on the Agent Approach // Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC 2018). 2018. P. 175–179. DOI: doi.org/10.1109/RPC.2018.8482157.

Gong H., Wang M. Q., Wang H. New energy vehicles in China: policies, demonstration, and progress // Mitigation and Adaptation Strategies Global Chang. 2013. Vol. 18. P. 207–228. DOI: doi.org/10.1007/s11027-012-9358-6.

Hove A., Sandalow D. Electric vehicle charging in China and the United States. New York : Columbia University, 2019. 88 p.

Kononov Y. D. Long-term Modeled Projections of the Energy Sector. Switzerland : Springer Nature, 2020. 100 p.

Mansour C., Haddad M., Zgheib E. Assessing consumption, emissions and costs of electrified vehicles under real driving conditions in a developing country with an inadequate road transport system // *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2018. Vol. 63. P. 498–513. DOI: doi.org/10.1016/j.trd.2018.06.012.

Mantzou L. The PRIMES. Version 2. Energy System Model: Design and features // *Economics, Energy and Environment*. 1999. Vol. 5. P. 155–200.

Mengnuo D. Research on the Securitization of Electric Vehicle Charging Network // *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. 2018. P. 296–301. DOI: doi.org/10.1109/CICED.2018.8592335.

Messner S. User's Guide for the Matrix Generator of Message II. Parts I and II: Model Description and Implementation Guide, and Appendices. International Institute for Applied System Analyses // Working Paper WP. 1984. URL: <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/2447/1/WP-84-071.pdf> (accessed: 14.10.2020).

Schlenzig C., Reuter A. MESAP-III: An information and decision support system for energy and environmental planning // *In Operations Research and Environmental Management*. Berlin : Springer-Verlag, 1996. Vol. 5. P. 155–200.

References

Batenin, V. M., Bushuev, V. V. & Voropai, N. I. (Eds.). (2017). *Innovatsionnaya elektroenergetika — 21 [The innovation-driven electric power industry — 21]*. Moscow: Energiya Publishing Center, 584. (In Russ.)

Bhattacharyya, S. & Timilsina, G. R. (2010). A Review of Energy System Models. *International Journal of Energy Sector Management*, 4, 494–518.

Bushuev, V. V., Gromov, A. I., Belogoriev, A. M. & Mastepanov, A. M. (2016). *Energetika Rossii. Poststrategicheskiy vzglyad na 50 let vpered [Russian Energy: A Post-Strategic Look at 50 Years Ahead]*. Moscow: Energiya Publishing and Analytical Center, 96. (In Russ.)

Figenbaum E. (2017). Perspectives on Norway's supercharged electric vehicle policy *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 25, 14–34. DOI: 10.1016/j.eist.2016.11.002.

Galperova, E. V. (2016). The long-term forecasting method of energy and fuel market demand with taking into account regional specificities and uncertainty growth. *Izvestiya RAN. Energetika*, 5, 33–44. (In Russ.)

Gal'perova, E. V. & Gal'perov, V. I. (2018). Modeling the Active Consumer Behavior Based on the Agent Approach. In: *2018 Russian-Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC 2018)* (pp. 175–179). Vladivostok. DOI: 10.1109/RPC.2018.8482157.

Gong, H., Wang, M. Q. & Wang, H. (2013). New energy vehicles in China: policies, demonstration, and progress. *Mitigation and Adaptation Strategies Global Chang*, 18, 207–228. DOI: 10.1007/s11027-012-9358-6.

Hove, A. & Sandalow, D. (2019). *Electric vehicle charging in China and the United States*. New York, NY: Columbia University, 88. Retrieved from: <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/digitalization-andenergy3.pdf> (Date of access: 22.11.2020)

Kononov, Yu. D. & Kononov, D. Yu. (2018). Analysis of methods and models applied to assess the options of long-term energy development. *Energeticheskaya politika [The energy policy]*, 3, 61–67. (In Russ.)

Kononov, Yu. D., Galperova, E. V., Kononov, D. Yu., Lagerev, A. V., Mazurova, O. V. & Tyrtshny, V. N. (2009). *Metody i modeli prognoznikh issledovaniy vzaimosvyazey energetiki i ekonomiki [Methods and models of forecasting studies of the relationship between energy and economics]*. Novosibirsk: Nauka, 178. (In Russ.)

Kononov, Yu. D. (2020). *Long-term Modeled Projections of the Energy Sector*. Switzerland: Springer Nature, 100.

Kononov, Yu. D. & Tyrtshny, V. N. (2011). Assessment of the impact of the nature of uncertainty in future conditions on the competitiveness of fuel supply options. *Energeticheskaya politika [The energy policy]*, 4, 90–94. (In Russ.)

Makarov, A. A., Mitrova, T. A. & Kulagin, V. A. (Eds.). (2019). *Prognoz razvitiya energetiki mira i Rossii 2019 [Global and Russian Energy Development Outlook 2019]*. Moscow: ERI RAS, 209. (In Russ.)

Malakhov, V. A. (2009). Approaches to forecasting electricity demand in Russia. *Problemy Prognozirovaniya [Studies on Russian Economic Development]*, 113(2), 57–62. (In Russ.)

Mansour C., Haddad M. & Zgheib E. (2018). Assessing consumption, emissions and costs of electrified vehicles under real driving conditions in a developing country with an inadequate road transport system. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 63, 498–513. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.06.012>.

Mantzou, L. (1999). The PRIMES. Version 2. Energy System Model: Design and features. *Economics, Energy and Environment*, 5, 155–200.

Mazurova, O. V. (2017). Installed power per employee as a factor of quantum leap in labor efficiency. *Promyshlennaya energetika [Industrial power engineering]*, 5, 2–8. (In Russ.)

Mengnuo, D. (2018). Research on the Securitization of Electric Vehicle Charging Network. In: *2018 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)* (pp. 296–301). IEEE. DOI: 10.1109/CICED.2018.8592335.

Messner, S. (1984). *User's Guide for the Matrix Generator of Message II. Parts I and II: Model Description and Implementation Guide, and Appendices*. Working Paper WP-84-71. International Institute for Applied System Analyses. Retrieved from: <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/2447/1/WP-84-071.pdf> (Date of access: 22.10.2020).

Russel, S. & Norvig, P. (2006). *Artificial intelligence: a modern approach, 2nd ed. [Iskusstvennyy intellekt. Sovremennyy podkhod, 2-e izd]*. Trans. from the English. Moscow: Williams Publishing House, 1408. (In Russ.)

Schlenzig C. & Reuter A. (1996). MESAP-III: An information and decision support system for energy and environmental planning. In: *Operations Research and Environmental Management*, Vol. 5 (pp. 155–200). Berlin: Springer-Verlag.

Shapot, D. V. & Malakhov, V. A. (2018). *Opyt razvitiya metodologii i razrabotki modeley mezhotraslevogo balansa [Lessons learned from developing managerial input-output models and elaborating the methodology behind them]*. Moscow: The Publishing House of the Moscow Power Engineering Institute, 176. (In Russ.)

Sidorenko, V. N. & Krasnoselsky, A. V. (2008). Imitation modeling in science and business: approaches, tools and application. *Biznes-informatika [Business Informatics]*, 2(08), 52–57. (In Russ.)

Voropai, N. I. (Ed.). (2010). *Sistemnye issledovaniya v energetike. Retrospektiva nauchnykh napravleniy SEI-ISEM [Systems Studies in the Power Industry: Retrospective Review of Research at Siberian Power Engineering Institute–Melentiev Institute of Energy Systems]*. Novosibirsk: Nauka, 686. (In Russ.)

Voropai, N. I. (Ed.). (2015). *Obosnovanie razvitiya elektroenergeticheskikh sistem. Metodologiya, modeli, metody, ikh ispolzovanie [Substantiation of development of electric power systems: methodology, models, methods, their use]*. Novosibirsk: Nauka, 448. (In Russ.)

Информация об авторах

Мазурова Ольга Васильевна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН; Scopus Author ID: 6602588810; <https://orcid.org/0000-0002-8912-0070> (Российская Федерация, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130; e-mail: ol.mazurova@yandex.ru).

Гальперова Елена Васильевна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН; Scopus Author ID: 6508242919; <https://orcid.org/0000-0001-6749-8630> (Российская Федерация, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130; e-mail: galper@isem.irk.ru).

Локтионов Вадим Ильич — кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН; Scopus Author ID: 57191888645; <https://orcid.org/0000-0001-8478-3222> (Российская Федерация, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130; e-mail: vadlok@mail.ru).

About the authors

Olga V. Mazurova — Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Associate, Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of RAS; Scopus Author ID: 6602588810; <https://orcid.org/0000-0002-8912-0070> (130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation; e-mail: ol.mazurova@yandex.ru).

Elena V. Galperova — Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Associate, Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of RAS; Scopus Author ID: 6508242919; <https://orcid.org/0000-0001-6749-8630> (130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation; e-mail: galper@isem.irk.ru).

Vadim I. Loktionov — Cand. Sci. (Econ.), Senior Research Associate, Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of RAS; Scopus Author ID: 57191888645; <https://orcid.org/0000-0001-8478-3222> (130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation; e-mail: vadlok@mail.ru).

Дата поступления рукописи: 03.11.2020.

Прошла рецензирование: 29.12.2020.

Принято решение о публикации: 07.04.2022.

Received: 03 Nov 2020.

Reviewed: 29 Dec 2020.

Accepted: 07 Apr 2022.