
УДК 620.92, 338.27

ДОЛГОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СПРОСА НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ ПРИ ПЕРЕХОДЕ К УГЛЕРОДНОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ

© 2025 г. Е. В. Гальперова¹, О. В. Мазурова^{1,*}

¹*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН), Иркутск, Россия*

**e-mail: ol.mazurova@yandex.ru*

Поступила в редакцию 03.12.2024 г.

После доработки 22.12.2024 г.

Принята к публикации 26.12.2024 г.

Статья посвящена прогнозным исследованиям спроса на электроэнергию в условиях декарбонизации российской экономики. Приводится анализ текущего состояния, долгосрочных тенденций, новых направлений использования электроэнергии и низкоуглеродных технологий в крупных секторах экономики. Используемый методический инструментарий представляет собой комплекс взаимосвязанных оптимизационных, имитационных и балансовых моделей разного назначения и уровня агрегирования. Представлены результаты прогнозной оценки динамики спроса на электроэнергию для одного из сценариев развития экономики на период до 2050 г. в условиях декарбонизации российской экономики. Приведена оценка дополнительного спроса на электроэнергию при интенсивной электрификации производственных и бытовых процессов, развития электротранспорта. Показано возможное влияние углеродного налога на перспективную структуру электростанций.

Ключевые слова: прогнозирование, спрос на электроэнергию, электрификация, энергопотребление, энергоэффективность, низкоуглеродные технологии, выбросы парниковых газов, углеродный налог

DOI: 10.31857/S0002331025010074

ВВЕДЕНИЕ

Переход к углеродной нейтральности становится важнейшим приоритетом в долгосрочных исследованиях перспектив развития энергетики разных стран мира [1–4]. Одним из ключевых требований Парижского соглашения по климату является разработка национальных стратегий долгосрочного развития с низким уровнем выбросов парниковых газов для снижения рисков климатических изменений для населения и экономики. В рамках этого соглашения принята Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года, предусматривающая в целевом (интенсивном)

сценарии снижение выбросов парниковых газов на 60% к концу периода по сравнению с 2019 г. и возможность достижения углеродной нейтральности к 2060 г. Выполнение поставленной цели невозможно без реструктуризации отраслей энергетики и экономики и решения задач, связанных с повышением энергетической эффективности, использованием наилучших доступных технологий, развитием альтернативных источников энергии, переходом к экономике замкнутого цикла. В связи с этим повышенный интерес вызывает изучение и анализ возможных последствий от реализации намеченных мер по декарбонизации экономики РФ [5]. Например, в монографии [6] представлены сценарные исследования эффективных темпов, средств и стоимости перехода энергетики России к низкоуглеродному развитию и его влияния на экономику страны.

В отдельных работах обсуждаются методологические и практические вопросы оценки эффектов, связанные с мероприятиями и технологическими возможностями для снижения выбросов углерода [7, 8]. В [9] описаны необходимые требования к энергообеспечению разных сценариев инвестиционной политики для успешного развития России в новых геополитических условиях в увязке с динамикой выбросов парниковых газов. В [10] приведены возможные траектории полного обнуления эмиссии CO_2 к 2060 г. с выделением технологических мероприятий. Использованию углеродного налога как экономического инструмента по сокращению выбросов парниковых газов посвящены российские и зарубежные исследования [11, 12].

В условиях модернизации экономики к достижению углеродной нейтральности увеличение масштабов замещения топлива и тепла электроэнергией ведут к быстрому росту электропотребления. Электрификация становится долгосрочным глобальным трендом, представляющим собой переход на более эффективный и универсальный энергоноситель в разных секторах потребления [13, 14]. При переходе возникает риск увеличения стоимости электроэнергии и снижения ее экономической доступности [15]. Такое удорожание возможно в том числе при введении платы за выбросы CO_2 [16].

Спрос на электроэнергию формируется под воздействием постоянно меняющихся во времени взаимосвязей между экономикой и энергетикой, условиями конкуренции энергоносителей и формирования цен [17]. Сложность такой оценки обусловлена, в частности, неустойчивым характером развития российской экономики, неопределенностью будущих условий социально-экономического и технологического развития. При исследовании долгосрочной динамики спроса на электроэнергию в условиях декарбонизации важно учитывать такие факторы как: повышение энергоэффективности, расширение электрификации производственных и непроизводственных процессов, активное развитие электротранспорта, применение низкоуглеродных технологий, замещение традиционных энергоносителей на альтернативные.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РОССИИ И В МИРЕ

За период 2010–2023 гг. ежегодный темп роста потребления электроэнергии в мире составлял 2.7% и опережал общий спрос на энергию (1.4%). Эта тенденция продолжится и в перспективе. Ожидается дальнейшее увеличение доли электроэнергии в конечном энергопотреблении (табл. 1). Согласно прогнозу Международного энергетического агентства (МЭА) [18], глобальный спрос на электроэнергию

Таблица 1. Динамика доли электроэнергии в конечном потреблении энергоресурсов в мире по прогнозам МЭА (IEA) и Управления энергетической информации США (U.S. EIA), %

Прогноз	2023 г. (отчет)	2030 г.	2050 г.
IEA, 2024	20	23–28	32–55
U.S. EIA, 2023	19	20	22

Источники: [18, 19].

может удвоиться и даже утроиться к 2050 г. в зависимости от рассматриваемого сценария. Ключевыми факторами повышения спроса на электроэнергию становятся электрификация быта и транспорта, расширение использования электрофизических и электрохимических процессов в промышленности, повышение электроемкости сельского хозяйства. Ускоренными темпами развиваются новые направления использования электроэнергии, связанные с цифровизацией различных сфер деятельности. В будущем крупными потребителями электроэнергии станут информационно-коммуникационные технологии [20].

Крупными потребителями электроэнергии в России являются промышленность (52%), население (15.7%), сектор услуг (20.3%) (рис. 1). Динамика электропотребления в России зависит от экономической ситуации в стране. С повышением экономической активности темпы прироста электроэнергии растут, а при появлении кризисных явлений они снижаются. За период 2015–2023 гг. потребление электроэнергии в целом по России увеличилось почти на 11% и достигло 1172.3 млрд кВтч. Основной рост приходился на домашние хозяйства за счет увеличения жилой площади, количества электроприборов, размеров крупной бытовой техники, электроотопления.

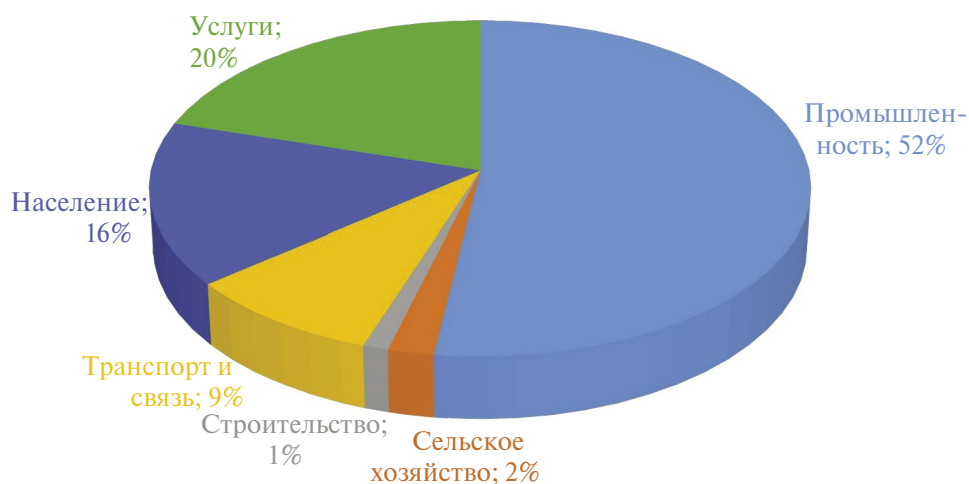


Рис. 1. Структура электропотребления в России в 2023 г.

Промышленность в России использовала на свои нужды в 2023 г. 609 млрд кВтч электроэнергии или 52% конечного электропотребления страны. Электроэнергия

в основном расходуется на электролиз алюминия, производство электростали, электротермические процессы. В черной металлургии успешно применяется технология производства стали в электродуговых сталеплавильных печах с использованием лома и железа прямого восстановления с низкими выбросами парниковых газов (ПГ). В России в 2022 г. доля электростали составляла 35%, к 2040–2050 гг. прогнозируется увеличение этой доли до 80–100% [21]. В цветной металлургии перспективным направлением является производство алюминия по технологии предварительно обожженных анодов на сверхмощных электролизерах второго поколения более экологичных и ресурсосберегающих. Производство алюминия по технологии “инертных” анодов предусматривает замену углеродных анодов на аноды из керамики или сплавов. Углеродный след алюминия, произведенного таким способом, в разы ниже по сравнению с традиционными технологиями, так как вместо выбросов CO_2 выделяется кислород. По мнению специалистов [22], для достижения углеродной нейтральности производства алюминия должна быть поставлена и выполнена амбициозная задача по увеличению доли производства алюминия по технологии инертных анодов до уровня не менее 36% к 2060 году.

За последние 20 лет отмечается сокращение выбросов ПГ в промышленности под влиянием снижения углеродоемкости в ее отраслях, в т.ч. за счет повышения энергоэффективности и расширения электрификации технологических процессов. Вклад промышленности в общие выбросы парниковых газов в России в 2021 г. составил почти 17% [23]. Около 70% промышленных выбросов CO_2 генерируется в металлургии, химической промышленности, промышленности строительных материалов. По оценке МЭА предполагается, что эти отрасли к 2050 г. обеспечат две трети снижения выбросов ПГ в промышленности [19].

Транспорт. Выбросы CO_2 на транспорте растут значительно быстрее, чем в других секторах экономики. Автомобильный транспорт является крупным загрязнителем после электроэнергетики и формирует около 20% мировых выбросов CO_2 . Перевод автомобильного парка с традиционных нефтяных энергоносителей на электроэнергию позволит существенно снизить углеродный след транспортного сектора.

В последние годы мировой рынок электротранспорта испытывает интенсивный рост. В 2023 г. в мире было продано 13,6 млн электромобилей, включая полностью электрические и гибридные автомобили. В странах Евросоюза прогнозируется рост численности парка электромобилей (включая гибриды) до 13 млн единиц к 2025 г., а к середине века предусматривается ввести полный запрет на продажи автомашин на традиционных видах топлива [24]. В Великобритании, Франции, скандинавских странах такой запрет планируется ввести еще раньше — с 2030–2040 гг. В США предполагается, что уже к 2030 г. до 50% новых легковых машин будут электрифицированными или работать на водородных топливных элементах. В Китае ожидается, что к 2030 г. доля электротранспорта в суммарных годовых продажах автомашин достигнет 40%. По прогнозу МЭА, к 2070 г. доля мирового парка электрифицированного транспорта составит почти 90% общего автопарка, а из парка автобусов две трети будут электрическими.

По мнению экспертов [25], развитие электрифицированного автопарка в России получит заметное ускорение не ранее, чем через 10–15 лет при условии снижения цен на электромобили. Однако процесс электрификации общественного транспорта нового поколения в нашей стране уже начался. Например, в Москве 50% всех поездов осуществляется чистым электрифицированным транспортом — это метро, МЦД и МЦК наземного железнодорожного транспорта, электробусы, трамваи.

Парк электробусов столицы становится одним из самых крупных в Европе, их количество превысило 1300 ед. Электробус потребляет на 35–40% меньше электроэнергии по сравнению с обычным троллейбусом за счет совершенствования системы управления и торможения, он почти в 2 раза экономичнее троллейбуса и в 6 раз — автобуса [26].

В будущем можно ожидать развития парка электрифицированного транспорта по всей стране [27]. Этому будет способствовать государственная Программа модернизации городского электротранспорта, согласно которой автобусы будут заменять на электробусы в разных городах России. По оценкам исследователей [28], доля электромобилей в России (в одном из сценариев) может составить в 2040 г., т.е. почти 50% суммарного автопарка, а к 2050 г. достигнет 100%. Интенсивное развитие электротранспорта в России может привести к существенным изменениям в энергетике и экологии.

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” [29, 30]. Владельцы, отдавая электроэнергию обратно в сеть, получают при этом дополнительный доход, либо могут использовать ее запасы для нужд домохозяйств, например, в период высоких тарифов.

Непроизводственный сектор. На долю мирового сектора жилых и коммерческих зданий приходится около 27% глобального объема выбросов CO₂. За период 2010–2022 гг. доля электроэнергии в структуре конечного энергопотребления зданий увеличилась с 30% до 35%. Согласно прогнозу МЭА, в перспективе под влиянием роста жизненного уровня повышаются требования к условиям проживания и работы [18]. Ожидается увеличение спроса на электроэнергию в мировом секторе зданий за счет роста оснащенности устройствами климат-контроля, бытовой и электронной техникой.

В России в настоящее время сектор строительства и эксплуатации зданий использует около 50% электричества и производит около 21% общенационального баланса выбросов парниковых газов [31, 32].

Одним из основных направлений использования электроэнергии в жилом секторе является электроприборы и бытовая техника. В России за 2010–2023 гг. обеспеченность кондиционерами и посудомоечными машинами выросла в 6 раз, СВЧ-печами в 2 раза, холодильниками и морозильниками на 19%. Среди электронных приборов рост оснащенности персональными компьютерами составил 2 раза, телевизорами 17% [31]. Увеличение жилой площади, номенклатуры и размеров используемых электроприборов вызвало рост электропотребления в жилом секторе за 2010–2023 гг. почти на 45%, а душевое электропотребление достигло 1259 кВтч/чел. Согласно данным, приведенным в [19], в 2022 г. на одного человека в секторе домохозяйств приходилось: в странах западной Европы — 1714 кВтч, в Японии — 2340 кВтч, в США — 4529 кВтч, в Канаде — 4790 кВтч. Приведенные цифры свидетельствуют о незавершенности процесса электрификации жилищного сектора в России и значительном потенциале роста электропотребления. Действенным способом снижения энергопотребления и экологического следа зданий является замена бытовой и офисной техники на модели с высоким классом энергоэффективности.

Решить экологические проблемы в секторе может помочь использование систем электроотопления в индивидуальных и многоквартирных домах (за счет замены угольных или мазутных котельных). В настоящее время жилые многоквартирные дома с использованием систем электроотопления уже построены и успешно эксплуатируются в ряде городов (Екатеринбург, Тюмень, Сочи и др.). Возможность регулирования потребления электрической энергии системами электроотопления позволяет использовать эти системы и в управлении спросом [33].

Еще одной технологией, способствующей сокращению использования ископаемого топлива в зданиях и снижению выбросов CO_2 , является внедрение тепловых насосов [34]. Сфера тепловых насосов активно развивается. Разрабатываются высокоэффективные тепловые насосы, которые могут работать в холодных климатических условиях. Интеграция тепловых насосов с системами возобновляемой энергии (солнечные панели, ветрогенераторы) позволит создавать полностью автономные системы отопления и охлаждения, а вместе с технологиями “умного дома” обеспечит оптимизацию потребления энергии и повышение комфорта проживания [35].

МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Долгосрочное прогнозирование электропотребления является важным этапом при разработке стратегий в области энергетической и экономической безопасности. Для исследования и прогнозирования потребностей в энергоносителях применяется достаточно большой арсенал методов как у нас в стране, так и за рубежом. Он представлен в виде отдельных моделей или сложных модельно информационных комплексов (МИК), базирующихся на эконометрических и аналитических методах, имитационном и оптимизационном моделировании, методах экспертных оценок и международных сравнений, балансовом методе “затраты-выпуск” и др. МИК позволяют проводить многовариантные расчеты для оценки возможных последствий реализации той или иной политики в области экономики, энергоснабжения, технологического развития и т.д. Подробное описание методов и анализ опыта использования моделей представлено, например, [36–40]. В европейских странах успешно применяются модели Market allocation model (MARKAL) [41] и Price-Induced Market Equilibrium System (PRIMES) [42], Model for Energy Supply Systems and Their General Environmental Impact (MESSAGE) [43] и др. [44, 45]. В США активно используется МИК National Energy Modeling System (NEMS), предназначенный для разработки ежегодных долгосрочных прогнозов развития энергетики страны и регионов [46]. Наиболее известный в России МИК SCANNER используется в ИНЭИ РАН для прогнозов развития топливно-энергетического комплекса России и мировых энергетических рынков [47]. В последние годы модельные комплексы активно применяются для оценки последствий декарбонизации и достижения углеродной нейтральности стран, применения новых инновационных, в том числе безуглеродных технологий.

В ИСЭМ СО РАН разработаны и постоянно развиваются методология и комплекс экономико-математических моделей, предназначенные для системного анализа вариантов развития ТЭК, перспективной оценки спроса на энергоносители, выявления стратегических угроз энергетической безопасности [48]. Методический подход к оценке спроса на электроэнергию исходит из того, что в перспективе спрос на электроэнергию будет формироваться в условиях растущей неопределенности на энергетических рынках и усиления конкуренции энергоносителей. Для реализации подхода разработан модельный комплекс, который объединяет нелинейную

оптимизационную модель экономики, модели конечного энергопотребления, стохастические оптимизационные модели энергоснабжения крупных потребителей. Исходной информацией для расчетов являются принимаемые к исследованию долгосрочные прогнозы социально-экономического развития страны. Они включают следующие основные макропоказатели: темпы роста ВВП и конечного потребления, инвестиции в основной капитал, экспорт и импорт продукции, численность населения. Эти данные используются в межотраслевой динамической оптимизационной модели, где рассчитывается динамика объемов продукции по 25-ти отраслям экономики, требуемые вводы новых мощностей, инвестиции, трудовые ресурсы и др.

В моделях конечного электропотребления производственной сферы (промышленность, строительство, сельское хозяйство) основной исходной информацией являются: динамика объемов производства валовой продукции и вводов новых мощностей, получаемая на макроэкономической модели, а также матрицы удельных расходов электроэнергии. При оценке динамики материало- и энергоемкости отдельных отраслей учитываются российские и мировые тенденции, ожидаемые изменения внутриотраслевой и технологической структуры, соотношение существующих и новых производственных мощностей и т.д.

Прогнозирование спроса на электроэнергию в непроизводственной сфере (домашние хозяйства и сфера услуг) основывается на динамике изменения душевого электропотребления. Для расчета последней используется имитационная модель, отражающая динамику изменения обеспеченности населения жилыми и общественными зданиями, структуры расселения (городское, сельское), степень насыщенности населения и сферы услуг разными видами электроприборов и их удельные расходы энергии, а также расходы энергии на освещение, приготовление пищи и т.п. Эти показатели принимаются на основе анализа существующих и возможных к реализации перспективных социальных, экономических и технологических факторов и взаимосвязей, влияющих на изменение уровня и стиля жизни населения и развитие сферы услуг.

Спрос на электроэнергию в транспортном секторе увязывается с темпами роста экономики, структурой грузовых и пассажирских перевозок, развитием отдельных видов транспорта (автодорожный, железнодорожный, трубопроводный, городской электрический) и динамикой удельных расходов энергии.

В завершение прогнозного исследования полученная динамика объемов электропотребления и электроемкости сравнивается с имеющимися отечественными и зарубежными прогнозами.

Для оценки возможной динамики стоимости генерации и цен на электроэнергию разработана оригинальная модель МИСС-ЭЛ, совмещающая оптимизацию развития электроэнергетики с методом Монте-Карло [49]. Она позволяет оценить конкурентоспособность разных типов электростанций для принятия инвестиционных решений. Критерий оптимальности в этой модели – минимум дисконтированных затрат на обеспечение заданной потребности в электроэнергии. Важная особенность МИСС-ЭЛ – все основные исходные данные и ограничения задаются не однозначно, а интервально, с возможностью учета различного характера распределения вероятностей внутри этого интервала. В результате расчетов на модели МИСС-ЭЛ из множества вариантов сбалансированного ввода мощностей формируется основной, включающий наименее рискованный состав электростанций

и обеспечивающий минимальную стоимость генерации электроэнергии в рассматриваемых условиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования был сформирован базовый сценарий развития экономики на основе официальных прогнозов [50–52]. Перспективная численность населения принята по среднему варианту демографического прогноза на период до 2046 г., разработанного Росстатом в 2023 г. и пролонгированного до 2050 г. [31]. В базовом сценарии ежегодные темпы роста ВВП за период 2030–2050 гг. составят 2.9%, объема промышленной продукции – 2.6% (табл. 2).

В промышленности предполагается развитие новых производств, переход на наилучшие доступные технологии, расширение электрификации технологических процессов. В углеродоемких производствах внедряются технологии с низким уровнем выбросов CO_2 и высокой ресурс- и энергетической эффективностью. Так, например, выплавка стали в электродуговых печах может увеличиться и достигнуть к 2050 г. 100%, а производство цемента “сухим” способом – 90%. Производственная структура существенно изменится: доля добывающих отраслей снизится с 41% до 28% к 2050 г. при увеличении доли обрабатывающих производств с 59% до 72%. В обрабатывающей промышленности электропотребление возрастет на 50% к 2050 г. за счет замещения теплоемких и топливоемких производственных процессов.

В базовом сценарии предполагается, что к 2050 г. при обеспеченности жильем 50–51 $\text{м}^2/\text{чел.}$ расход электроэнергии на 1 м^2 жилой площади увеличится до 50–52 кВтч в России (для сравнения в США в 2022 г. обеспеченность жилой площадью была 63 $\text{м}^2/\text{чел.}$, расход электроэнергии – 73 кВт ч/ м^2) за счет роста освещенности, обеспеченности бытовыми приборами и электромобилями, применения автоматизированных систем управления энергопотреблением.

При умеренных темпах роста электрификации автомобильного транспорта доля электроэнергии в структуре энергопотребления увеличится с 14% в 2022 г. до 20% к 2050 г.

Таблица 2. Основные показатели базового сценария развития экономики России на период до 2050 гг.

Показатели	Отчет 2023 г.	Прогноз по годам		
		2030 г.	2040 г.	2050 г.
Средние темпы роста ВВП, %	-	2.3	3.4	3.0
Среднегодовые темпы роста промышленной продукции, %	-	2.0	3.0	2.7
Численность населения, млн чел.	146. 2	143.3	140.0	138.0
Обеспеченность жилой площадью, кв.м/чел.	28.8	33.3	42.5	51.0
Обеспеченность площадью общественных зданий, кв.м/чел.	7.2	8.3	10.6	12.7
Обеспеченность автомобилями, ед./тыс.чел.	315	380	430	460

Источник: расчеты авторов.

Сопоставление результатов будущего спроса на электроэнергию рассматриваемого базового сценария с существующими российскими прогнозами показано на рис. 2. Несмотря на то, что прогнозы в целом отличаются отчетной статистикой, целевыми установками, горизонтам прогнозирования, они довольно близки по своей динамике полученному и описанному выше прогнозу.

Вместе с тем был рассчитан дополнительный спрос на электроэнергию при более интенсивной электрификации автомобильного транспорта с ростом доли электробусов и электромобилей до 30–40% к 2040–2050 гг. в общем автомобильном парке. В этом случае дополнительный прирост спроса на электроэнергию (по отношению к базовому варианту) может составить приблизительно 160 млрд кВт ч., а снижение объемов парниковых газов – не менее 40 млн т в год.

Ускоренное внедрение низкоуглеродных и электроемких технологий в промышленности, роботизация ведения домашнего хозяйства, увеличение обеспеченности электромобилями, рост использования электроотопления ускоряют процесс электрификации. Развитие искусственного интеллекта и цифровизация финансовых операций значительно увеличат потребности в электроэнергии центров обработки данных. В результате дополнительная потребность в электроэнергии к концу рассматриваемого периода может увеличиться не менее, чем в 1.7 раза по сравнению с 2023 г. (рис. 2), а душевое электропотребление достигнет современного уровня Канады – страны со сходными климатическими условиями и структурой экономики (рис. 3).

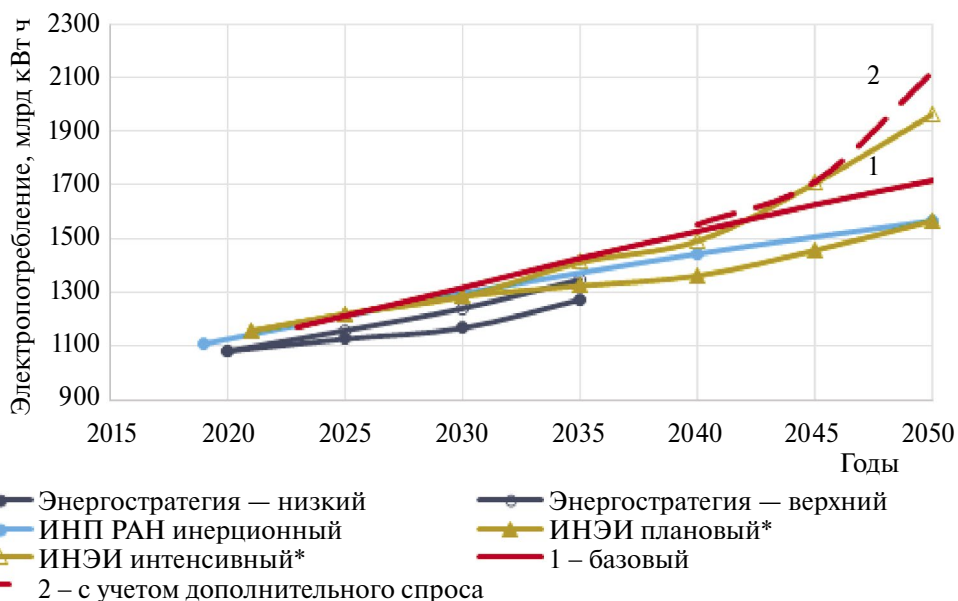


Рис. 2. Сравнение полученного прогноза с существующими российскими прогнозами по электропотреблению.

Периоды прогнозирования: Энергостратегия РФ [53] 2020–2035 гг.: низкий; высокий варианты; ИНП РАН 2019–2050 гг.: инерционный вариант [54]. ИНЭИ РАН 2025–2050 гг.: плановый; интенсивный (*производство) [9]); Полученный прогноз 2023–2050 гг.: 1 – базовый; 2 – с учетом дополнительного спроса на электроэнергию.

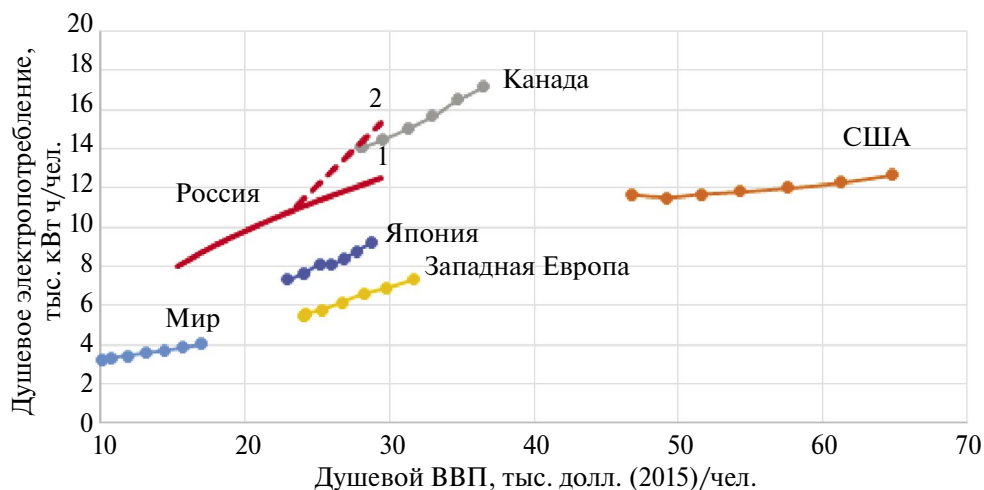


Рис. 3. Сравнение полученной прогнозной зависимости душевого электропотребления от душевого ВВП в России на фоне развитых стран мира в 2022–2050 гг.
Источник: для зарубежных стран рассчитано по [19].

Проведенное в ИСЭМ СО РАН исследование [16] показало, что введение углеродного налога оказывает заметное влияние на снижение доли угольных и газовых электростанций и увеличения доли безуглеродных станций (ВИЭ, АЭС, ГЭС) за счет роста повышения конкурентоспособности нетопливной генерации (табл. 3). При углеродном налоге в размере 10–40 долл. США/т CO_2 средневзвешенная стоимость электроэнергии может увеличиться от 6 до 20%, а эмиссия CO_2 снизиться на 11–45% в зависимости от изменения цены на углерод (табл. 4). При рассмотрении более отдаленной перспективы это влияние может быть более значительным. Так, по оценке ЦЭНЭФ [55], введение в России в 2050 г. углеродного налога в размере до 50 долл. США/т CO_2 позволит увеличить долю генерации на солнечных и ветровых станциях (ВИЭ) до 18%, а долю безуглеродных станций – до 62% (против 36% в 2019 г.).

Таблица 3. Возможное влияние платы за выбросы CO_2 на структуру новых и реконструируемых электростанций в Европейской части страны (включая Урал), %

Тип электростанции	Цена углерода, долл. США/ т CO_2				
	0	10	20	30	40
КЭС и ТЭЦ: газовые	74	75	73	65	53
	11.5	4	0	0	0
АЭС и ГЭС	8.5	12	14	21	31
ВИЭ	6	9	13	14	16

Примечание — Структура электростанций на уровне 2035 г. при заданных ограничениях на ввод АЭС и крупных ГЭС и при ожидаемых технико-экономических показателях ВИЭ.
Источник: [16].

Таблица 4. Влияние цены углерода на выбросы CO₂ и стоимость генерации в Европейской части России, %

Показатель	Цена углерода, долл. США/т CO ₂				
	0	10	20	30	40
Выбросы CO ₂	100	89	75	67	55
Средняя стоимость электроэнергии	100	106	111	116	120

Источник: [16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Россия становится активным участником мировых процессов декарбонизации: ратифицировано Парижское соглашение по климату, принята Стратегия низкоуглеродного развития РФ, разрабатываются водородная стратегия и другие документы стратегического планирования. При реализации заявленных целей электроэнергия становится доминирующим энергоносителем, который обеспечивает повышение энергоэффективности и снижение углеродоемкости практически во всех видах деятельности экономики.

В будущем углубление и расширение электрификация технологических процессов позволит повысить производительность труда, улучшить качество жизни населения и будет способствовать сохранности окружающей среды. Обеспечение возрастающей потребности в электроэнергии экономики и населения страны, вызванной новой электрификацией транспорта, бытовых и производственных процессов, является ключевой задачей электроэнергетики.

Согласно проведенному исследованию, спрос на электроэнергию в базовом сценарии может увеличиться в 1.5 раза к 2050 г., а при еще более интенсивной электрификации с учетом дополнительной потребности в электроэнергии в производственном и непроизводственном секторах — в 1.7 раза. Показано, что по росту душевого электропотребления тенденции в России близки к мировым.

По оценкам, приведенным в [16], введение углеродного налога непосредственно влияет на стоимость электроэнергии и перспективную структуру электростанций. Степень этого влияния зависит не только от величины налога, но и от особенностей экономики страны или региона, структуры электроэнергетики и т.д.

Представленные результаты прогнозирования спроса на электроэнергию в условиях декарбонизации российской экономики носят экспериментальный характер, однако они дают представление о направлении и масштабах изменения энергопотребления и могут быть полезны при разработке, долгосрочных программ и стратегий развития энергетики.

Статья подготовлена в рамках проекта государственного задания № FWEU-2021-0003 Программы фундаментальных исследований РФ на 2021–2030 гг. (рег. № AAAA-A21-121012090014-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector. IEA. 2021. 224 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.iea.org (дата обращения: 12.08.2024).
2. World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway, International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi. 2023. 258 p. [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.irena.org/publications (дата обращения: 22.09.2024).
3. Hansen K., Mathiesen B.V. and Skov I.R. Full energy system transition towards 100% renewable energy in Germany in 2050. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019. V. 102. Pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.038>
4. Zhang S., Chen W. China's energy transition pathway in a carbon neutral vision // *Engineering*. 2022. V. 14. P. 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.09.004>
5. Веселов Ф.В., Хоршев А.А., Ерохина И.В., Аликин Р.О. Исследование направлений и сопутствующих затрат при снижении эмиссии углерода в электроэнергетике до 2050 года с учетом межотраслевых факторов // *Проблемы прогнозирования*. 2023. № 6 (201). С. 79–90. DOI: 10.47711/0868-6351-201-79-90.
6. Исследование путей и темпов развития низкоуглеродной энергетики в России (под ред. А.А. Макарова). М.: ИНЭИ РАН, 2022. 156 с.
7. Филиппов С.П., Веселов Ф.В., Кейко А.В., Хоршев А.А. Подходы к формированию прогнозов развития ТЭК России как составной части сценариев декарбонизации экономики страны // *Проблемы прогнозирования*. 2023. № 6(201). С. 67–78. DOI: 10.47711/0868-6351-201-67-78.
8. Филиппов С., Попель О., Тарасенко А., Арапов М. Возобновляемые источники энергии: вклад в декарбонизации энергетики России // *Теплоэнергетика*. 2024. № 11. С. 59–71. DOI: 10.56304/S0040363624700346.
9. Макаров А.А., Веселов Ф.В., Малахов В.А. Сценарии интенсификации развития экономики и энергетики России // *Проблемы прогнозирования*. 2024. № 4. С. 102–119. DOI: 10.47711/0868-6351-205-102-119.
10. Bashmakov I., Bashmakov V., Borisov K., Dzedzichuk M., Lunin A., Govor I. 2022. Russia's carbon neutrality: pathways to 2060. CENef-XXI [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cenef-xxi.ru/articles/russia's-carbon-neutrality:-pathways-to-2060> (дата обращения: 20.06.2024).
11. Goulder L.H., Schein A. Carbon taxes versus cap and trade: a critical review. *Climate Change Economics*, 2013. V. 4. № 3. Pp. 1350010 (1–28).
12. Bashmakov I.A. Carbon tax in the system of taxes on energy and environmental taxes. *Ecological Bulletin of Russia*, 2018. № 3. Pp. 1–13.
13. Некрасов С.А. Рост электропотребления российских регионов как фактор их социально-экономического развития // *Экономика региона*. 2022. № 18(2). С. 509–527. DOI: 10.17059/ekon.reg.2022-2-15.
14. Батенин В.М., Бушуев В.В., Воронай Н.И. и др. Инновационная электроэнергетика – 21. М.: ИЦ Энергия, 2017. 584 с.
15. Веселов Ф., Макаров А., Хоршев А., Ерохина И. Развитие электроэнергетики – на распутье стратегических решений // *Энергетическая политика*. № 2(193). 2024. С. 90–105. DOI: 10.46920/2409-5516_2024_2193_90.
16. Кононов Ю.Д., Кононов Д.Ю. Возможное влияние введения платы за выбросы парниковых газов на стоимость электроэнергии // *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. 2021. Т. 17. № 9. С. 1612–1624. DOI: 10.24891/ni.17.9.1612.

17. Гальперова Е.В., Мазурова О.В. Долгосрочное прогнозирование спроса на электроэнергию в условиях неопределенности социально-экономического развития страны и конъюнктуры региональных энергетических рынков // *Электроэнергия: передача и распределение*. 2020. № 3. 2020. С. 41–45.
18. World Energy Outlook 2023. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iea.org> (дата обращения: 11.09.2024).
19. U.S. Energy Information Administration. International Energy Outlook 2023. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo> (дата обращения: 24.06.2024).
20. Digitalization & Energy. International Energy Agency OECD/IEA. 2017 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/digitalizationandenergy3.pdf> (дата обращения: 17.05.2024).
21. Баишаков И.А. и др. Мониторинг применения низкоуглеродных технологий в России: возможности для ускорения и риски отставания. М.: ЦЭНЭФ, 2020. 261 с.
22. Баишаков И.А. и др. Низкоуглеродные технологии в России. Нынешний статус и перспективы. М.: ЦЭНЭФ, 2023. 173 с.
23. Доброхотова М.В., Матушанский А.В. Применение концепции наилучших доступных технологий в целях технологической трансформации промышленности в условиях энергетического перехода // *Экономика устойчивого развития*. 2022. № 2(50). С. 63–68.
24. Веселов В.Ф., Соляник А.И., Аликин Р.О. Влияние электрификации в секторе дорожного транспорта на уровень электропотребления и суточный график нагрузки в ЕЭС России // *Известия РАН. Энергетика*. 2023. № 1. С. 57–71.
25. Хомутов И.А., Лишневецкая А.И. и др. Зеленая революция в Европе: что она несет России? Часть 1. Автотранспорт. М., ИГ “ПЕТРОМАРКЕТ”, 2021. 97 с.
26. Петров М.Б., Кожов К.Б. Новые возможности и новые проблемы перехода к электрическим транспортным технологиям // *Вестник Уральского университета путей сообщения*. 2018. Т. 40. № 4. С. 33–46. DOI: 10.20291/2079-0392- 2018-4-33-45.
27. Семикашев В.В., Колпаков А.Ю., Яковлев А.А., Ростовский Й.-К. Развитие рынка электромобилей в России как необходимое условие получения выгод от глобального тренда на электрификацию транспорта // *Проблемы прогнозирования*. 2022. № 3(192). С. 52–63. DOI: 10.47711/0868-6351-192-52-63.
28. Трофименко Ю.В., Донченко В.В., Рузский А.В. и др. Разработка сценариев низкоуглеродного развития автомобильного транспорта в Российской Федерации. М.: АО НЦТИ. 2020. 120 с.
29. Tuttle D.P., Baldick R. The evolution of plug-in electric vehicle-grid interactions, *IEEE Trans. Smart Grid*. V. 3 (1). 2012. Pp. 500–505.
30. Fasugba M.A., Krein P.T. Cost benefits and vehicle-to-grid regulation services of unidirectional charging of electric vehicles, in: *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE 2011)*, Phoenix, USA, Sept. 17–22. 2011. Pp. 827–834.
31. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/>
32. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, 1990–2020 годы. М.: ФГБУ “ИГКЭ”. 2022. 468 с.
33. Анфимов С.С., Коротченко В.В. Электроотопление – локальная ниша или глобальная перспектива в условиях энергоперехода? [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=4296 (дата обращения: 22.05.2024).

34. Сравнительный обзор существующих технологий по повышению энергетической эффективности зданий в регионе ЕЭК ООН. Европейская экономическая комиссия Организации объединенных наций, Женева, 2019. 71 р. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://unesce.org/DAM/energy/se/pdfs/geee/study/Mapping_of_existing_technologies_RUS_30.04.pdf (дата обращения: 22.05.2024).
35. Появление и развитие тепловых насосов: Как эта технология изменилась и как она используется сегодня [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://mircli.ru/news/rojavlenie-i-razvitie-teplovyh-nasosov-kak-eta-tehnologiya-izmenilas-i-kak-ona-ispolzuetsya-seg/?srsltid=AfmB0oqx4gd4N-DE779xMhByHEzkysTXXQZcYpfbPR8A-WJ-P63S2Mt> (дата обращения: 29.05.2024).
36. Филиппов С.П., Малахов В.А., Веселов Ф.В. Долгосрочное прогнозирование спроса на энергию на основе системного анализа // Теплоэнергетика. 2021. № 12. С. 5–19. DOI: 10.1134/S0040363621120043.
37. Кононов Ю.Д. Методы и модели прогнозных взаимосвязей энергетики и экономики / Новосибирск. Наука, 2009. 178 с.
38. Bianco V. The future of the Italian electricity generation sector. An analysis of the possible strategic models // Foresight and STI Governance. 2018. V. 12. № 3. Pp. 20–28. DOI: 10.17323/2500-2597.2018.3.20.28.
39. Swan L.G., Ugursal V.I. Modeling of end-use energy consumption in the residential sector: A review of modeling techniques // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. V. 13(8). Pp. 1819–1835.
40. Bhattacharyya S.C., Timilsina G.R. A Review of Energy System Models / International Journal of Energy Sector Management. 2010. № 4(4). Pp. 494–518.
41. Mantzos L., Capros P. The primes. Version 2. Energy system model: design and features // Economics, Energy and Environment. 1999. № 5. Pp. 155–200.
42. Schrattenholzer L. Energy Supply Model Message and Its Application to IIA-SA's World Region Physics and Contemporary Needs. Springer, Boston, MA. 1984. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-4724-8_7
43. 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. V. 5. Pp. 155–200.
44. Loulou R. Documentation for the TIMES Model. PART I July 2016. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://iea-etsap.org/docs/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-I_July-2016.pdf (дата обращения: 22.05.2024).
45. Mantzos L., Matei N.A., Rózsai M., Russ P., Ramirez A.S. POTEnCIA: A new EU-wide energy sector model. Published in: 2017 14th International Conference on the European Energy Market (EEM).06-09 June 2017, IEEE. DOI: 10.1109/EEM.2017.7982028.
46. The National Energy Modeling System: An Overview 2018. U.S. Department of Energy, 2019. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview/pdf/0581\(2018\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/nems/overview/pdf/0581(2018).pdf) (дата обращения: 22.05.2024).
47. Макаров А.А. и др. SCANNER – модельно-информационный комплекс. М.: ИНЭИ РАН, 2011. 72 с.
48. Кононов Ю.Д., Кононов Д.Ю. Анализ методов и моделей, используемых при оценке вариантов долгосрочного развития ТЭК // Энергетическая политика. 2018. № 3. С. 61–67.

49. Кононов Ю.Д. Экономическая составляющая энергетической безопасности: методы оценки и учета в прогнозах развития ТЭК // Кононов Ю.Д., Кононов Д.Ю. Новосибирск: СО РАН, 2023. 127 с.
50. Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2036 года Разработан Министерством экономического развития России в 2018 г. <https://www.economy.gov.ru/> (дата обращения: 4.05.2024).
51. Сценарные условия функционирования экономики Российской Федерации, основные параметры прогноза социально-экономического развития Российской Федерации на 2025 год и на плановый период 2026 и 2027 годов. https://www.economy.gov.ru/material/file/9b5be59d09bd494dcbcafedcf460c2a8/scenarnye_usloviya_funkcionirovaniya_ekonomiki_rf_2024.pdf (дата обращения: 16.11.2024).
52. Стратегия долгосрочного развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Утв. Распоряжением Правительства РФ от 29 октября 2021 г. № 3052-п. <http://static.government.ru/media/files/ADKkCzp3fWO32e2yA0BhtIpyzWfHaiUa.pdf> (дата обращения: 20.06.2024).
53. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Утверждена от 9 июня 2020 г. № 1523-п <https://ac.gov.ru/files/content/1578/11-02-14-energostrategy-2035-pdf.pdf> (дата обращения: 4.05.2024).
54. Потенциальные возможности роста российской экономики: анализ и прогноз. Научный доклад / Под ред. чл.-корр. РАН Шишова А.А. М.: Артик Принт, 2022. 296 с.
55. Баишаков И.А. Низкоуглеродное развитие мира и России: прошлое и будущее // Нефтегазовая вертикаль. 2020. № 17. С. 26–35.

Long-Term Projections of Electricity Demand During the Transition to Carbon Neutrality

E. V. Galperova^a, O. V. Mazurova^{a,*}

^a*Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

^{*}*e-mail: ol.mazurova@yandex.ru*

The study discusses projections of electricity demand in the context of decarbonization of the Russian economy. We analyze the current state, long-term trends, and new applications of electricity and low-carbon technologies in major sectors of the economy. The study relies on a set of interrelated optimization, simulation, and input-output models as its methodological backbone. Each of the models serves its specific purpose and is tailored to a specific level of data aggregation. We report our projections of the dynamics of electricity demand for one of the scenarios of economic development to 2050 under decarbonization of the Russian economy. The study also provides estimates of extra demand for electricity resulting from intensive electrification of industrial and household processes, as well as electric transport development. We provide estimates of the possible impact of carbon tax on the prospective mix of power plants.

Keywords: projections, electricity demand, electrification, energy consumption, energy efficiency, low-carbon technology, greenhouse gas emissions, carbon tax